

3442-14/82

INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ

TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG

DIREKTOREN: PROF. DR.-ING. DR.-ING. E. h. K. KORDINA · PROF. DR.-ING. F. S. ROSTÁSY

Rißverhalten von faserbewehrtem Beton  
mit zusätzlicher schlaffer Bewehrung

Bericht erstattet von:

Prof. Dr.-Ing. F. S. Rostásy

Dipl.-Ing. K. Hartwich

BRUNNEN

Braunschweig, August 1982

Gefördert mit Hilfe von Forschungsmitteln des  
Landes Niedersachsen (s. Erlaß des MWK vom  
19.04.1979, Az. 2091 B V 4e - 34/78)

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
Bezeichnungen . . . . .	1
1. Problemstellung und Ziele . . . . .	2
2. Versuchsprogramm . . . . .	3
3. Versuchskörper . . . . .	4
4. Baustoffe . . . . .	5
4.1 Beton . . . . .	5
4.2 Betonstahl . . . . .	7
4.3 Stahlfasern . . . . .	7
5. Versuchsaufbau und Meßtechnik . . . . .	8
6. Versuchsdurchführung . . . . .	9
7. Versuchsergebnisse . . . . .	11
7.1 Dehnungsverhalten . . . . .	11
7.2 Rißbildung . . . . .	15
7.3 Mittlerer Rißabstand und Ergebnisse der Riß- breitenmessung . . . . .	16
8. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen . . . . .	29
9. Literatur . . . . .	32

## BEZEICHNUNGEN

$\mu_f$	Fasergehalt
$\mu_s$	Bewehrungsgrad
$d_s$	Betonstahldurchmesser
$A_b$	Betonquerschnittsfläche
$A_{bi}$	ideelle Betonquerschnittsfläche $A_{bi} = A_b (1 + n\mu_s)$
$c$	Betonüberdeckung
$s$	Stababstand
$\beta_w$	Betonwürfeldruckfestigkeit
$\beta_{bz}$	Betonzugfestigkeit
$\beta_{bz}^{zk}$	Betonzugfestigkeit gemessen am Zugkörper
$E_b$	Elastizitätsmodul des Betons
$E_s$	Elastizitätsmodul des Betonstahls
$E_i$	ideeller Elastizitätsmodul des Zugkörpers
$n$	$= E_s / E_b$
$K_{Di}$	Steifigkeit des Zugkörpers im Zustand I
$Z$	Zugkraft
$Z^1$	Erstrißzugkraft
$\sigma_{sR}$	Stahlspannung im Riß
$\sigma_{sR}^1$	Erstrißstahlspannung
$\epsilon_m$	mittlere Betondehnung
$\epsilon_s$	Dehnung des "nackten" Bewehrungsstahls
$w_i$	Rißbreite eines Risses
$w_m$	mittlere Rißbreite
$a_m$	mittlerer Rißabstand
$a_{me}$	mittlerer Endrißabstand

## 1. PROBLEMSTELLUNG UND ZIELE

Stahlbetontragwerke weisen bei Überschreiten einer Betondehnung an gezogenen Querschnittsrändern von etwa 0,1 bis 0,2‰ stets Risse auf. Zur Gewährleistung eines ausreichenden Korrosionsschutzes fordern die Vorschriften in bestimmten Fällen eine Beschränkung der Rißbreiten (DIN 1045, Abschnitt 17.6). Hierdurch ergeben sich unter Umständen (z. B. Temperaturzwang) große Bewehrungsmengen.

Aus der Literatur [1,2] ist bekannt, daß durch die Beimengung von Stahlfasern sowohl die Zugfestigkeit des Betons als auch die Dehnsteifigkeit von Stahlbetonkörpern positiv beeinflußt werden kann. Ebenso konnte qualitativ nachgewiesen werden, daß eine zusätzliche Stahlfaserarmierung das Rißverhalten von Stahlbetonbauteilen verbessert, d. h. die Rißbreiten erheblich verringert. Die im folgenden berichtete Forschungsarbeit hat zum Ziel, einen Beitrag zur Klärung der Wirksamkeit einer Stahlfaserbewehrung zur Reduzierung der Rißbreiten auf Zug beanspruchter Stahlbetonbauteile zu leisten.

Die Durchführung der Forschungsarbeit wurde durch Mittel des Niedersächsischen Zahlenlottos ermöglicht, wofür die Verfasser ihren Dank aussprechen.

## 2. VERSUCHSPROGRAMM

Wie in Abschnitt 1 erläutert wird, galt es, den quantitativen Einfluß einer zusätzlichen Faserarmierung auf die Rißbildung und die Rißbreitenentwicklung von Stahlbetonstäben bei zentrischem Zug zu erfassen. Der als Versuchskörper gewählte, axial gezogene Stahlbetonstab mit rechteckigem Querschnitt und mittiger Bewehrung kann als Ausschnitt der Betonzugzone eines Biegebauteils aufgefaßt werden. Mit diesem Versuchskörper kann die freie Entwicklung der Risse - unbeeinflußt durch Schnittkraft- und/oder Spannungsgradienten - in Abhängigkeit von den wesentlichen Stahlbetonparametern studiert werden.

Die Rißbildung in Stahlbetonbauteilen wird durch eine Reihe von Parametern beeinflusst. Als Hauptparameter wurden der Fasergehalt  $\mu_f$ , der Bewehrungsgrad der schlaffen Bewehrung  $\mu_s$  und die Faserart untersucht. Hierdurch ergab sich der untenstehende Versuchsplan.

Tab. 2.1: Übersicht über die durchgeführten Versuche und die untersuchten Parameter

Versuchs- bez. ZK	Fasergehalt $\mu_f$ [Vol.-%]	Bewehrungsgrad $\mu_s$ [%]	Faserart
1	1,50	1,50	glatte Fasern
2	0,75	1,50	glatte Fasern
3	1,50	1,50	Hakenfasern
4	0,75	1,50	Hakenfasern
5	1,50	0,75	glatte Fasern
6	0,75	0,75	glatte Fasern
7	1,50	0,75	Hakenfasern
8	0,75	0,75	Hakenfasern
9	-	1,50	-
10	-	0,75	-

Gleichwohl wurde der Einfluß der Betonüberdeckung und die Wirkung einer schwellenden Belastung auf die Rißbreite untersucht. Betongüte und der Bewehrungsdurchmesser wurden nicht verändert. Es wurde für alle Versuche Betonstahl BSt 420/500 RU mit einem Durchmesser von 14 mm verwendet und die Betongüte B 35 angestrebt.

Das für das Rißverhalten wichtige Verhältnis  $d_s/\mu_s$  variierte zwischen 93 cm und 187 cm. Der Verhältniswert  $\mu_f \cdot l/d$ , wobei  $\mu_f$  den prozentualen Anteil an Fasern im Beton kennzeichnet,  $l$  die Faserlänge in mm und  $d$  den Faserdurchmesser in mm angibt, bewegte sich zwischen 45 und 94.

### 3. VERSUCHSKÖRPER

Die Zugkörper besaßen einen Rechteckquerschnitt von  $b/d = 20/10$  cm. Die Gesamtlänge betrug 3,50 m. Der Meßbereich hatte eine Länge von 2,50 m. In der Anlage 1 sind Längsschnitte und Querschnitte der Versuchskörper abgebildet.

Die Bewehrungsgehalte ergaben sich bei Anordnung von zwei Bewehrungsstäben  $\emptyset 14$  mm zu  $\mu_s = 1,56 \%$ , bei den Querschnitten mit nur einem Bewehrungsstahl zu  $\mu_s = 0,78 \%$  (ZK 5, 6, 10) bzw. zu  $\mu_s = 0,76 \%$  (ZK 7, 8). Für die beiden letztgenannten Zugkörper mußte ein Bewehrungsstahl  $\emptyset 14$  mm mit geringfügig veränderten Querschnitts- und Festigkeitswerten verwendet werden. Bei den Zugkörpern mit nur einem Bewehrungsstahl im Bereich der Meßlänge wurden in den Endbereichen jeweils zwei Zulagestäbe  $\emptyset 14$  mm angeordnet, um die Zugkräfte auf möglichst geringer Länge einleiten zu können.

Sowohl die Hauptbewehrung als auch die Zulagebewehrung ragten beidseitig aus dem Betonkörper heraus. Die Verankerungslaschen für die Lastaufbringung wurden mit den Betonstählen verschweißt.

Die Versuchskörper wurden liegend betoniert. Eine genaue Positionierung der Bewehrungsstähle wurde durch mehrfaches Abhängen an dünnen Drähten und seitliches Verspannen mit Schweißdraht erreicht. Eine Bügelbewehrung wurde nicht angeordnet.

## 4. BAUSTOFFE

### 4.1 Beton

Zur Herstellung des Betons wurde ein Portlandzement PZ 35 F verwendet.

Die Kornverteilung des Zuschlaggemisches wurde so gewählt, daß sie im Bereich  $< 4$  mm möglichst der Regelsieblinie B<sub>16</sub> nach DIN 1045 entsprach. Die Kornzusammensetzung  $> 4$  mm orientierte sich an der Sieblinie C<sub>16</sub>. Es wurden an einem Betontag jeweils zwei Zugkörper hergestellt, deren Kornzusammensetzung die gleiche war. Die Kornverteilung der Zuschlaggemische und die Grenzlinien der Sieblinien sind aus den Anlagen 2a bis 2c ersichtlich.

Die Zusammensetzung des Ausgangsbetons ohne Fasern war für alle Versuchskörper gleich (siehe Tabelle 4.1).

Tab. 4.1: Zusammensetzung des Ausgangsbetons

Baustoffe je m <sup>3</sup> Beton in kg			W/Z-Wert
Zement	Zuschlag	Wasser	
313	1718	219	0,7

Bei den Zugkörpern ZK 1 bis ZK 8 wurden die Stahlfasern während des Mischvorgangs zugegeben. Hierbei wurde auf eine gute Vereinzelung der Stahlfasern geachtet. Durch besondere Sorgfalt wurde ein Verklumpen der Fasern ("Igelbildung") vermieden.

Die Fasermengen und die volumenmäßigen Anteile der Fasern sind Tabelle 4.2 zu entnehmen.

Tab. 4.2: Fasermengen, Fasergehalt

Versuchskörper	Fasermenge je m <sup>3</sup> Beton in kg	Faseranteil in Vol.-%
ZK 1, 3, 5, 7	117,8	1,48
ZK 2, 4, 6, 8	58,9	0,74

Die Konsistenz des Betons wurde durch Zugabe des Betonverflüssigers "Addiment" der Heidelberger Zement-AG so eingestellt, daß ein sehr fließfähiger Beton der Konsistenz K3 erreicht wurde. Die Verdichtung erfolgte durch Stochern.

Sämtliche Zugkörper und Begleitprobekörper lagerten die ersten 7 Tage nach dem Betonieren unter feuchten Tüchern. Sie wurden danach in die Prüfhalle gebracht, wo sie bis zum Prüftermin bei rd. 20/65 lagerten.

Die Druckfestigkeit  $\beta_w$  des Betons wurde an Würfeln mit einer Kantenlänge von 15 cm in der Regel am ersten Versuchstag ermittelt. Die Festigkeitswerte sind der Anlage 3 zu entnehmen.

Die zentrische Zugfestigkeit  $\beta_{bz}$  des Betons wurde zu Versuchsbeginn an zylindrischen Probekörpern  $\emptyset/h = 15/30$  cm bestimmt. Hierzu wurden Stahlplatten an die Stirnseiten der Probekörper geklebt. Um ein vorzeitiges Versagen in der Klebefuge zu vermeiden, waren die Probekörper auch seitlich auf ca. 2 cm Höhe über eine Stahlmanschette mit den Lastplatten verklebt. Als Kleber diente "Technovit" der Firma Kulzer & Co. GmbH, Bad Homburg. Die Belastung erfolgte mit konstanter Abzugsgeschwindigkeit zügig bis zum Bruch. Die Festigkeitswerte sind in der Anlage 3 wiedergegeben.



Nach Erreichen der Reißlast wiesen die Faserbetonproben ein deutlich anderes Verhalten als die Normalbetonproben auf. Während beim Normalbeton wegen des schlagartigen Steifigkeitsabfalls der Zugprobe und der dadurch verursachten elastischen Rückfederung der Belastungseinheit der Probekörper sofort in zwei Teile zerrissen wurde, wiesen die Faserbetonproben auch im gerissenen Zustand eine vom Fasergehalt und Faserart abhängige Resttragfähigkeit auf.

Zum Vergleich mit den Festigkeitswerten der Zugproben sind die Betonzugfestigkeiten  $\sigma_{bz}^{ZK}$  aus den Erstrißlasten der großen Versuchskörper errechnet worden. Der Rechengang hierfür ist in Abschnitt 7.1 aufgeführt. Hieraus ergeben sich erwartungsgemäß erheblich niedrigere Zugfestigkeiten, die im Mittel nur etwa 54,5 % der zentrischen Zugfestigkeit der Begleitproben beträgt.

Die Anlage 3 enthält ebenfalls die Spaltzugfestigkeiten der untersuchten Betone.

#### 4.2 Betonstahl

Für den Betonstahl BSt 420/500 RU wurde eine Prüfung nach DIN 488 durchgeführt. Die Spannungs-Dehnungs-Diagramme und die Materialkennwerte können der Anlage 4 entnommen werden.

#### 4.3 Stahlfasern

Für die Untersuchungen fanden zwei Fasertypen Verwendung. Der eine Fasertyp ist die glatte Wirex-Stahlfaser der Firma Trefil-ARBED, Köln, mit einem Durchmesser von 0,4 mm und einer Länge von 25 mm, Verhältnis  $l/d = 62,5$ . Die Fasern bestehen aus blankgezogenem Stahldraht. Die Mindestzugfestigkeit wird vom Hersteller mit  $\min \sigma_z = 1000 \text{ N/mm}^2$  angegeben.

Bei der anderen Faser handelt es sich um die DRAMIX-Stahlfaser des Typs ZC 30/.50 der Firma BEKAERT DEUTSCHLAND GmbH, Bad Homburg v. d. H. Die Fasern weisen gekröpfte Faserenden (Haken-

fasern) auf. Die einzelnen Fasern sind mit einem Spezialkleber zu Faserelementen zusammengeklebt. Die Faservereinzelnung erfolgt während des Mischvorgangs sowohl durch die Reibung der Zuschlagstoffe als auch dadurch, daß die Klebverbindung durch die Eigenfeuchte der Zuschläge gelöst wird. Der Durchmesser der Einzelfaser beträgt 0,5 mm, die Länge 30 mm ( $l/d = 60$ ).

## 5. VERSUCHSAUFBAU UND MESSTECHNIK

Auf die Zugkörper wurden mittig auf alle vier Seiten Rißmeßlinien aufgezeichnet, auf denen während der Versuchsdurchführung die Rißbreiten bestimmt wurden. Zur besseren Rißlokalisierung wurde ein Raster mit einem Abstand von 10 cm aufgetragen (s. Anlagen 5 und 22 ÷ 31).

Die Längenänderung der Zugkörper wurde mit zwei Meßuhren mit einer Teilung von 1/100 mm und zwei induktiven Weggebern (WG) des Typs W 10 der Firma Hottinger-Baldwin-Meßtechnik über Meßstangen gemessen. Die Meßbasis betrug 2500 mm. Die Anordnung der Meßuhren und der Weggeber sowie die Abmessungen der Meßrahmen und deren Befestigung am Zugkörper sind aus den Anlagen 5 und 6 ersichtlich. Zusätzlich wurde zur Bestimmung der Dehnungen der Zugkörper auf die Rißmeßlinien 1 bis 3 jeweils eine Kette von Setzdehnungsmeßpunkten mit einem Abstand von 500 mm über eine Gesamtlänge von 2000 mm geklebt.

Für die Krafteinleitung waren Stahllaschen an die aus den Zugkörpern herausragenden Betonstähle angeschweißt (s. Anlage 1). Die Zugkörper wurden dann in den Prüfraumen gehängt und durch Bolzen kraftschlüssig mit der Belastungsvorrichtung verbunden (s. Anlage 9). Die Belastung wurde durch einen 200 KN-Prüfzylinder aufgebracht. Die Zugkraftmessung erfolgte mit einem elektrischen Öldruckgeber, der an einen Meßverstärker angeschlossen war.

Die Rißbreitenmessung wurde nach folgendem Ablaufschema durchgeführt: Markieren der Risse und Messen ihrer Breite in bestimmten Meßlinien. Die erste Messung nach Entstehen eines Risses erfolgte mit einer elektronischen Meßkamera. Der Riß wurde

auf einem Monitor abgebildet, die Rißbreite wurde dann mit einem Meßraster (2/100 mm Teilung) bestimmt. Die Rißaufweitung wurde, nach Aufkleben von Meßplättchen, mit einem Setzdehnungsmesser (Typ Tensotast, Teilung 1/1000 mm) verfolgt.

## 6. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Alle Zugkörper wurden einem zentrischen kraftgesteuerten Zugversuch unterworfen. Die Zugkraft wurde durch Ölpresen erzeugt. Die Steuerung der Pressen erfolgte von Hand in der Art, daß ein bestimmtes Lastniveau angefahren und die Last dann für die Durchführung der Rißmessungen konstant gehalten wurde.

Die erste Laststufe wurde durch die Erstrißkraft  $Z^1$  vorgegeben. Die Zugkraft wurde zügig mit geringer Belastungsgeschwindigkeit bis zum Auftreten der ersten Risse aufgebracht. Der erste Riß kündigte sich durch eine rasche Zunahme der Gesamtdehnung  $\epsilon_m$  an. Die Dehnungszunahme war aus den Aufzeichnungen des x-y-y-Schreibers und des 2-Kanal-Linienschreibers ersichtlich.

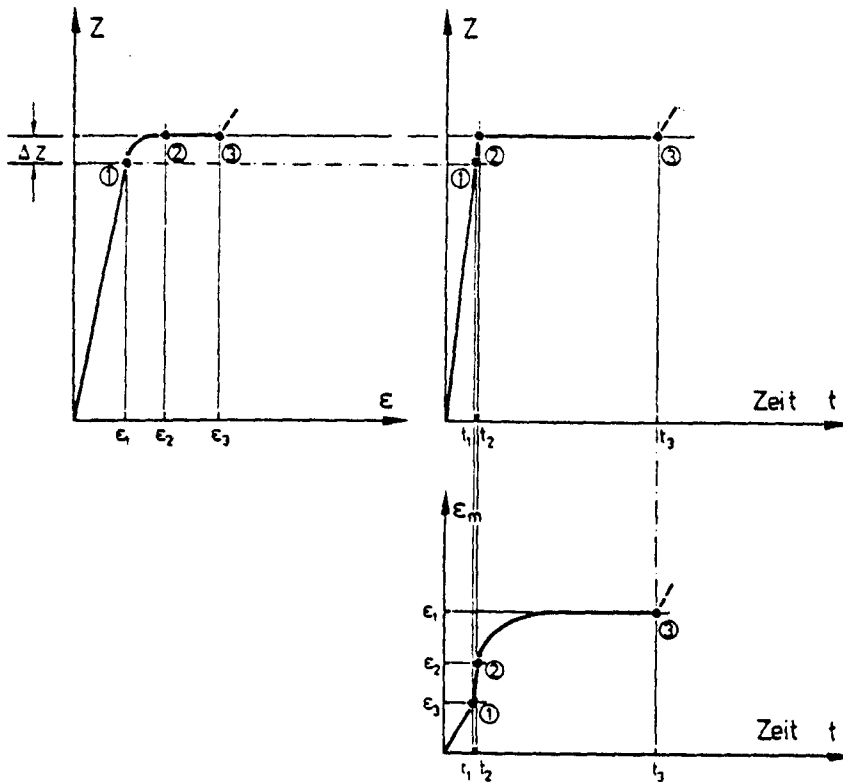
Obgleich das Dehnverhalten der Zugkörper sehr aufmerksam verfolgt wurde, konnte nicht ausgeschlossen werden, daß die Erstrißlast "überfahren" wurde. Dies ist im wesentlichen darin begründet, daß in der Regel der erste Riß den Querschnitt des Zugkörpers nicht schlagartig durchtrennte - dies insbesondere bei Versuchskörpern mit Faserbeton - und folglich kein sprunghafter Dehnungsanstieg zu verzeichnen war. Die Last, bei der die erste Rißmessung durchgeführt wurde (Punkt 3), lag somit in der Regel geringfügig über der tatsächlichen Erstrißkraft (s. Abb. 6.1).

Für die Betrachtung des Rißverhaltens wird im folgenden als Erstrißlast  $Z^1$  diejenige Last bezeichnet, bei der die erste Rißbreitenmessung erfolgte.

Nach Erreichen der Erstrißlast wurde die Last stufenweise erhöht. Bei einer Last, die einer bezogenen Zugkraft  $Z/A_s \approx 300 \text{ N/mm}^2$  entspricht, wurde der Versuchskörper auf  $Z/A_s \approx 120 \text{ N/mm}^2$  teilentlastet. Zwischen diesen beiden Lastniveaus wurden insgesamt fünfzig Lastwechsel ausgeführt, wobei jeweils nach zehn und

fünfzig Lastwechseln die Rißbreiten gemessen wurden. Der Zugversuch endete nach deutlichem Fließen der Betonstähle.

Abb. 6.1: Belastungsgeschichte bei Erreichen der Erstrißzugkraft  $Z^1$



Der Ablauf der Messungen erfolgte immer in derselben Reihenfolge: Nach Erreichen einer Laststufe wurden die neu aufgetretenen Risse angezeichnet, die Setzdehnungsmeßplättchen geklebt, die Kameramessungen durchgeführt und anschließend alle Rißbreiten mit dem Setzdehnungsmesser gemessen. Dann wurde die Gesamtdehnung  $\epsilon_m$  mit dem Setzdehnungsmesser mit der Meßbasis von 500 mm auf den Meßlinien 1 bis 3 bestimmt. Als letztes wurde die Gesamtdehnung der Versuchskörper aus den Werten der Meßuhren und der Weggeber ermittelt.

## 7. VERSUCHSERGEBNISSE

### 7.1 Dehnungsverhalten

Die mit Weggebern gemessenen mittleren Dehnungen  $\epsilon_m$  der Versuchskörper, die gleichzeitig die mittleren Stahldehnungen  $\epsilon_{sm}$  des Bewehrungsstahls im Bereich der Meßstrecke darstellen, sind in Abhängigkeit von der Belastung in den Anlagen 8 bis 17 dargestellt. In den Abbildungen ist auch die  $Z$ - $\epsilon_s$ -Linie des "nackten" Bewehrungsstahls (reiner Zustand II) eingezeichnet.

Im ungerissenen Zustand (Zustand I) verläuft die Dehnung einer der Steifigkeit der Versuchskörper entsprechenden Geraden:

$$\epsilon_m = \frac{Z}{K_{Di}} = \frac{Z}{E_b \cdot A_{bi}} \quad (1)$$

Der Zustand I endet beim Erreichen der Betonzugfestigkeit  $\beta_{bz}$  bzw. der Betonzugbruchdehnung  $\epsilon_{bz}$ . Bei den Zugkörpern, deren anfänglicher Dehnungsverlauf gestrichelt eingezeichnet ist, wurde bereits vor Belastungsbeginn ein Riß festgestellt. Infolgedessen ist Dehnsteifigkeit dieser Versuchskörper geringer.

Nach Überschreiten der Erstrißzugkraft  $Z^1$  steigt die mittlere Dehnung sprunghaft an. Das System verweicht zunehmend mit steigender Belastung und wachsender Anzahl der Risse. Der stufenartige Verlauf der  $Z$ - $\epsilon_m$ -Linie resultiert aus der kraftgesteuerten Belastungsart. Der horizontale Verlauf der Dehnungslinie beinhaltet auch die Zunahme von  $\epsilon_m$  innerhalb der Zeit an, die für das Anzeichnen der Risse und für die Durchführung der Messungen benötigt wurde. Ebenso ist bei allen Versuchen eine Vergrößerung der Dehnung infolge der Schwellbelastung zu verzeichnen. Dieses Verhalten ist für drei ausgewählte Versuche in Anlage 18 exemplarisch dargestellt.

Aus dem horizontalen Abstand der oberen Einhüllenden der  $Z$ - $\epsilon_m$ -Linie von der Spannungs-Dehnungslinie des "nackten" Bewehrungsstahls können wir die Mitwirkung des Betons auf Zug ablesen. Sie ist in der Regel unmittelbar oberhalb der Erstrißzugkraft  $Z^1$



$$\frac{\sigma_{sR}^1}{\sigma_{sR}} = \frac{\Delta \epsilon \beta_{bZ}}{\mu_s E_s} \quad (5)$$

In den Anlagen 19 und 20 ist die gemessene Mitwirkung des Betons aller Zugkörper den theoretischen Werten nach dem Ansatz von Rao in Abhängigkeit vom Beanspruchungsgrad gegenübergestellt.

Die Betonzugfestigkeit  $\beta_{bZ}$  wurde über die Erstrißzugkraft der Zugkörper bestimmt. Hierbei ist  $Z^1$  diejenige Kraft, die am Punkt 1 gem. Abb. 6.1 gemessen wurde:

$$\beta_{bZ} = \frac{Z^1}{A_b (1 + n\mu_s)} \quad (6)$$

Das Verhältnis der E-Moduli von Stahl zu Beton wurde aus der gemessenen Steifigkeit im Zustand I errechnet. In den Fällen, bei denen vor Versuchsbeginn bereits ein Riß vorhanden war, wurde für  $E_i$  der mittlere Wert aller übrigen Zugkörper eingesetzt. Aus

$$n = \frac{1}{E_i/E_s - \mu} \quad (7)$$

erhält man an der Zugkraft 20 kN den ideellen E-Modul:

$$E_i = \frac{20 \text{ kN}}{A_b \cdot \epsilon_{20 \text{ kN}}^I} \quad (8)$$

Es ist zu erkennen, daß die gemessene Mitwirkung des Betons auf Zug in der Regel deutlich über der Rao-Geraden liegt; mit zunehmender Beanspruchung nähert sie sich dieser bzw. unterschneidet diese sogar. Ein etwas anderes Verhalten zeigt lediglich der Versuchskörper ZK 6, bei dem die Mitwirkung bis zum Erreichen der theoretischen Streckgrenzenlast  $Z/A_s = 420 \text{ MN/m}^2$  der schlaffen Bewehrung ansteigt.

Generell sagen die Anlagen 19 und 20 aus, daß die Mitwirkung des Betons umso größer ist, desto größer der Fasergehalt  $\mu_f$  ist. Ein Unterschied in der Wirkungsweise zwischen den einzel-

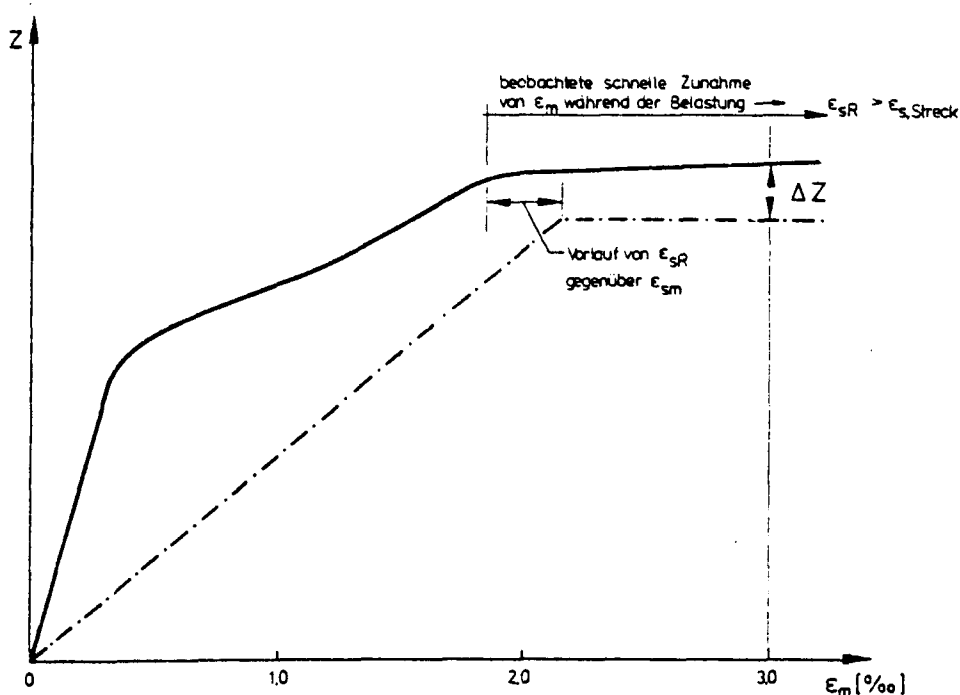
nen Fasertypen ist nur insoweit festzustellen, daß für die Versuchskörper mit zwei Bewehrungsstäben die Mitwirkung des Faserbetons mit glatten Fasern größer ist als die des Faserbetons mit den Hakenfasern; bei den Versuchskörpern mit nur einem Bewehrungsstab verhält es sich genau umgekehrt.

Besonders deutlich wird die Mitwirkung des Faserbetons, wenn man für eine Gesamtdehnung von  $\epsilon_m = 3,0 \%$ , die praktisch im Fließplateau des Bewehrungsstahls liegt, die zugehörige Differenzkraft  $\Delta Z$  in Abhängigkeit vom Fasergehalt aufträgt (Anlage 21 und Abb. 7.2). Die Differenzkraft ergibt sich aus der aufnehmbaren Last des Versuchskörpers bei einer mittleren Dehnung von  $3,0 \%$  abzüglich der Last, die der schlaaffe Bewehrungsstahl bei derselben Dehnung trägt:

$$\Delta Z = Z^{ZK} - Z^{Stahl}$$

(9)

Abb. 7.2: Überschreiten der Streckgrenzenlast bei Faserbeton



Man erkennt, daß mit zunehmendem Fasergehalt die Tragfähigkeit des Stahlbetonversuchskörpers in etwa linear ansteigt. Dieses gilt für beide untersuchten Faserarten, wobei kein wesentlicher Unterschied in der Größe der Differenzkräfte für die beiden Fasertypen festzustellen ist.



Bereits Rostásy/Alda [4] haben bei Zugversuchen an Stahlleichtbetonkörpern vom Auftreten derartiger Differenzkräfte berichtet und als Ursache dafür den Dehnungsvorlauf der Stahldehnung im Riß gegenüber der mittleren Stahldehnung - mit der ja verglichen wird - angegeben. Die tatsächlich im Rißquerschnitt vorhandenen Stahlspannungen liegen somit bei Abweichung der wirklichen  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linie des Stahls vom angenommenen bilinearen Verlauf über den Vergleichsstahlspannungen.

Die sehr großen Differenzkräfte, die für die Faserbetonversuchskörper bestimmt worden sind, lassen sich allerdings nicht allein auf den Versteifungseffekt des zwischen den Rissen mitwirkenden Betons zurückführen. Eine beschleunigte Dehnungszunahme der Versuchskörper während der Belastung wurde erst bei Lasten oberhalb der Streckgrenzenlast des Bewehrungsstahls beobachtet; der Stahl geriet somit erst später ins Fließen.

Dieses läßt den Schluß zu, daß bei den Faserbetonversuchen die Stahlfasern auch über den Riß hinweg anteilig Lasten übertragen haben. Daß Faserbeton auch im gerissenen Zustand über eine gewisse Resttragfähigkeit verfügt, ist bereits im Abschnitt 4.1 beschrieben worden. Shah et al. [5] haben gezeigt, daß der gerissene unbewehrte Faserbeton in Abhängigkeit von der Faserart und der Rißbreite Lasten aufnehmen kann und dies sogar bei Rißbreiten von größer als 2 mm.

## 7.2 Rißbildung

Die Anlagen 22 bis 31 zeigen die Rißbilder der Versuchskörper für vier ausgewählte Laststufen. Die jeweils oberste Abbildung gibt das Rißbild in einer niedrigen Laststufe wieder, aus den beiden mittleren Abbildungen sind der Risseverlauf und die Rißanzahl für einen Bereich fortgeschrittener Rißausbildung ersichtlich, die unterste Abbildung stellt das endgültige Rißbild dar.

Die Risse verlaufen normal zur Beanspruchungsrichtung. Auffällig ist, daß der Anteil der den ganzen Querschnitt der Probekörper durchtrennenden Risse mit steigender Belastung anwächst und daß diese Trennrisse bei den Zugkörpern mit Faserbeton anteilig deutlich geringer vertreten sind als bei den Versuchskörpern ohne Faserarmierung. Dies gilt unabhängig von der Menge des schlaffen Bewehrungsstahls. Während bei den Versuchskörpern mit zwei Betonstabstählen die Rißbildung vornehmlich über die Breitseiten erfolgte, ging die Rißentwicklung bei den Zugkörpern mit einem Stahl überwiegend von den Schmalseiten aus.

Bei einigen Zugkörpern könnten bei hoher Belastung Längsrisse über den Bewehrungsstäben beobachtet werden. Diese Verbundsprengrisse treten hauptsächlich bei den Versuchskörpern mit einem Bewehrungsstahl auf, und zwar ausschließlich auf den Breitseiten. Die Längsrißbildung war umso ausgeprägter, je niedriger der Fasergehalt des Betons war.

### 7.3 Mittlerer Rißabstand und Ergebnisse der Rißbreitenmessung

Wie bereits im Abschnitt 7.2 erwähnt wurde, stellte sich bei den untersuchten Versuchskörpern keine einheitliche durchgehende Trennrißbildung ein. Hinsichtlich der Rißbildung verhielten sich die Zugkörper mit zwei Bewehrungsstäben ( $\mu_s = 1,50 \%$ ) prinzipiell anders als diejenigen mit nur einem Bewehrungsstab ( $\mu_s = 0,75 \%$ ). Im folgenden soll deshalb die Betrachtung der Rißentwicklung getrennt nach diesen beiden Gruppen ( $\mu_s = 1,50 \%$  bzw.  $\mu_s = 0,75 \%$ ) durchgeführt werden.

Die Gruppe der ZK mit zwei Stäben (ZK 1, 2, 3, 4, 9) zeichnete sich dadurch aus, daß die Betonüberdeckung  $\bar{u}_b$  in allen vier Rißmeßlinien etwa gleich ist. Somit sind nach den bekannten Formeln für den mittleren Rißabstand und für die mittlere Rißbreite auf allen vier Meßlinien identische Werte zu erwarten [4, 6, 7]. Bei dieser Gruppe von Versuchskörpern werden die Ergebnisse der Rißmessungen auf den Meßlinien 1 und 3 - somit auf den Breitseiten - näher erläutert; anschließend wird ein Vergleich mit den Meßwerten der übrigen Meßlinien angestellt.

Aus den Rißbildern der Versuchskörper mit zwei Bewehrungsstäben ist zu erkennen, daß die Risse in der Regel von einer Breitseite (ML 1 oder 3) ausgehen, wobei die Risse auch in die angrenzenden Seitenflächen hineinlaufen. In einigen Fällen waren die Risse auch auf der gegenüberliegenden Breitseite als sehr feine Risse sichtbar. Bei weiterer Belastung konnte beobachtet werden, daß nur eine Gruppe von Rissen sich erweitert hatte, während die feinen Risse auf der Gegenseite keine lastabhängige Rißaufweitung zeigten.

Am Beispiel des Zugkörpers ZK 9 sollen die beobachteten Rißtypen erläutert werden. Die Anlage 32 zeigt die Rißbreiten  $w_i$  einiger ausgewählter typischer Risse in Abhängigkeit von der Belastung, ausgedrückt durch die bezogene Zugkraft  $Z/A_s$ . Die Risse des Typs A zeigen eine von der Lasthöhe abhängige Rißbreite, während die Risse des Typs D sich bezüglich ihrer Breite weitgehend von der Belastung unbeeinflusst verhalten. Bei der letztgenannten Rißgruppe handelt es sich um die sog. Gegenrisse, die einem Hauptriß der Gruppe A auf dem Zugkörper gegenüberliegen. Nicht selten gingen derartige Gegenrisse bei steigender Belastung wieder ganz zu. Auch die Risse der Typen B und C müssen gemeinsam betrachtet werden. Ein Riß des Typs B öffnet sich anfänglich mit anwachsender Last wie ein Riß des Typs A. Der Riß durchtrennt dann ab einer bestimmten Laststufe den Versuchskörper, wobei sich auf der Gegenseite gerade ein Riß mit der Breite bildet, die der Rißaufweitung des Risses vom Typ B entsprochen hätte, hätte sich dieser wie ein Riß vom Typ A verhalten. Derartige Gegenrisse sind in der Abbildung mit einem C gekennzeichnet.

Für die Angabe der mittleren Rißbreite  $w_m$  und damit auch für die Darstellung des mittleren Rißabstands  $a_m$  - denn  $w_m = \sum w / \text{Rißanzahl}$  und  $a_m = l_0 / \text{Rißanzahl}$  - sind für die Zugkörper mit zwei Bewehrungsstählen alle Gegenrisse bei der Ermittlung der Rißanzahl ohne Berücksichtigung geblieben. Der unter dieser Vereinbarung gefundene endgültige Rißabstand  $a_{me}$  steht in guter Übereinstimmung zu dem nach CEB [7] errechneten Endrißabstand.

$$\begin{aligned} \text{rechn } a_{me} &= 2 \left( C + \frac{s}{10} \right) + \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \frac{d_s}{\mu_s} \\ &= 2 \left( 4,3 + \frac{10}{10} \right) + 0,1 \cdot \frac{1,4}{0,015} \\ &= \underline{\underline{19,9 \text{ cm}}} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\text{gem } a_{me} = \underline{\underline{23,8 \text{ cm}}}$$

Hierin bedeuten:

C: Betondeckung in cm

s: Stababstand in cm

$\alpha_1 \cdot \alpha_2$ : Beiwerte; für zentr. Zug und Rippenstahl zu 0,1 zu setzen

$d_s$ : Stabdurchmesser in cm

$\mu_s$ : Bewehrungsgrad

Es muß noch erwähnt werden, daß die oben beschriebene Art der Rißbildung nicht durch eine ungewollte exzentrische Belastung hervorgerufen wurde. Sowohl die Messungen der Gesamtdehnung auf der Oberfläche der Versuchskörper als auch die Summe der Rißbreiten haben gleiche Dehnungswerte für gegenüberliegende Seiten ergeben.

In der Anlage 33 ist die Entwicklung des mittleren Rißabstandes  $a_m$  auf den Meßlinien 1 und 3 in Abhängigkeit von Beanspruchungsgrad  $(Z - Z^1)/Z$  für die Serie der Versuchskörper mit zwei Bewehrungsstählen dargestellt. Der mittlere Rißabstand errechnet sich aus dem Quotienten der Gesamtlänge der Meßlinien 1 und 3 ( $2 \cdot l_0 = 500 \text{ cm}$ ) zu der Gesamtanzahl der Risse auf den betrachteten Meßlinien. Durch die Wahl des Beanspruchungsgrades als Abzissenbezeichnung wird erreicht, daß alle Kurven auf der Ordinate ihren Ursprung haben. Dadurch können Unterschiede in der Betonfestigkeit ausgeglichen und somit eine bessere Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse erzielt werden.

Die Kurvenverläufe verdeutlichen, daß mit steigender Beanspruchung der mittlere Rißabstand stetig abnimmt. Der Steilabfall der Kurven gibt Auskunft über die Verteilung der Betonzugfestig-

keitkeit über die Länge der Versuchskörper. Beim Stahlbetonzugkörper ZK 9 ist zu erkennen, daß sich bereits in den unteren Laststufen eine Vielzahl von Rissen gebildet hat. Die übrigen Versuchskörper aus Stahlfaserstahlbeton weisen eine allmähliche Ausbildung des Rißbildes auf. Des weiteren konnte beobachtet werden, daß sich durch die schwellende Belastung die Anzahl der Risse vergrößerte. Dieses drückt sich in der Abbildung in einer sprunghaften Abnahme des Rißabstandes bei dem der Oberlast entsprechenden Beanspruchungsgrad aus. Im Bereich hoher Belastung nähert sich der mittlere Rißabstand einem Endwert, und es kann von einer abgeschlossenen Rißbildung gesprochen werden. Es wurden folgende Endrißabstände gemessen:

Tab. 7.1: Gemessene Endrißabstände  $a_{me}$  bei  $\mu_s = 1,50 \%$

	gem $a_{me}$	Fasergehalt	Faserart
ZK 1	18,5 cm	$\mu_f = 1,50 \%$	glatte Fasern
ZK 2	23,8 cm	$\mu_f = 0,75 \%$	
ZK 3	17,2 cm	$\mu_f = 1,50 \%$	Hakenfasern
ZK 4	22,7 cm	$\mu_f = 0,75 \%$	
ZK 9	23,8 cm	ohne Fasern	

Die Messung der Rißbreiten erfolgte in der in Abschnitt 6 beschriebenen Weise. Für die Versuchskörper mit zwei Stäben ergaben sich für die Meßlinien 1 und 3 annähernd gleiche Werte für die Rißbreitensumme. Der Anlage 34 ist zu entnehmen, daß die mittlere Rißbreitensumme auf den Meßlinien 1 und 3 mit steigender Beanspruchung stetig anwächst. Der ohne Fasern hergestellte Zugkörper ZK 9 weist über alle Laststufen hinweg über eine deutlich größere Rißbreitensumme auf. Die faserbewehrten Zugkörper ordnen sich bezüglich der Größe der Rißbreitensumme im wesentlichen nach der Menge der beigegebenen Fasern, und zwar so, daß die Probekörper mit dem niedrigeren Fasergehalt die vergleichsweise größere Summe der Rißbreiten besitzen. Es gilt für alle Versuche, daß infolge einer schwellenden Belastung die Rißbreitensumme deutlich zunimmt.

In der Anlage 35 sind für die Versuchskörper mit zwei Stäben die gemessenen mittleren Rißbreiten über der bezogenen Zugkraft aufgetragen.

$$w_m = \frac{\sum w_i}{\text{Anzahl der Risse}} \quad (11)$$

Aus dieser Darstellung der Ergebnisse der Rißbreitenmessung wird deutlich, welchen deutlichen Einfluß die Stahlfasern auf die Rißbildung ausüben. Die Rißbreiten vergrößern sich naturgemäß mit steigender Belastung. Jedoch ist zu vermerken, daß die Zunahme der Rißbreiten bei den Stahlfaserbetonkörpern geringer ausfällt. Hierdurch stellt sich für die oberen Laststufen, in absoluten Werten ausgedrückt, eine stärkere Reduzierung der Rißbreiten als in unteren Laststufen ein. Über annähernd den gesamten Bereich der Belastung liegen die Rißbreiten für den niedrigen Fasergehalt ( $\mu_f = 0,75 \%$ ) klar über denen für den hohen Fasergehalt ( $\mu_f = 1,50 \%$ ); es ergaben sich in allen Fällen kleinere Rißbreiten als für den Vergleichszugkörper ZK 9 ohne Fasern.

Durch die schwellende Belastung wurden die Versuchskörper stärker gedehnt, so daß in der Regel auch die Rißbreiten anwuchsen. Gleichzeitig vergrößerte sich meistens auch die Anzahl der Risse, was bewirken kann, daß die mittlere Rißbreite nahezu unverändert bleibt (s. ZK 9).

Zum Vergleich ist in der Abbildung (Anlage 35) auch die Kurve für die rechnerisch ermittelte Rißbreite  $w_m$  nach CEB für ZK 9 eingezeichnet. Sie beruht auf folgenden Beziehungen:

$$w_m = \text{gem } a_{me} \cdot \epsilon_m \quad (12)$$

$$\text{mit } \epsilon_m = \frac{\sigma_{sR}}{E_s} \left[ 1 - \beta_1 \cdot \beta_2 \left( \frac{\sigma_{sR}}{\sigma_{sR}^1} \right)^2 \right] \leq 0,4 \frac{\sigma_{sR}}{E_s} \quad (13)$$

Vergleichbare Formeln zur Beschreibung des Dehnverhaltens werden von Rao [3] und Rostásy [8] angegeben:

$$\epsilon_m = \frac{1}{E_s} \left[ \sigma_{sR} - \left( \frac{k_4}{\mu_s} \right)^2 \cdot \frac{1}{\sigma_{sR}} \right] \quad [\text{Rao}] \quad (14)$$

$$\epsilon_m = \frac{1}{E_s} \left[ \sigma_{sR} - \left( \frac{\beta_{bZ}}{\mu_s} \right)^2 \cdot \frac{1 + n\mu_s}{\sigma_{sR}} \right] \quad [\text{Rostásy}] \quad (15)$$

Durch Einsetzen der Gl. (13) in Gl. (12) und gleichzeitiges Umformen unter Verwendung der Gleichung

$$\sigma_{sR}^1 = \frac{\text{gem } \beta_{bZ} \cdot (1 + n\mu_s)}{\mu_s} \quad (16)$$

erhalten wir für die rechnerische mittlere Rißbreite die folgende Beziehung

$$\text{rechn } w_m = \text{gem } a_{me} \cdot \frac{1}{E_s} \left[ \sigma_{sR} - \beta_1 \beta_2 \left( \frac{\text{gem } \beta_{bZ} (1 + n\mu_s)}{\mu_s} \right)^2 \frac{1}{\sigma_{sR}} \right] \quad (17)$$

Eine Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse für den Zugkörper ZK 9 ohne Stahlfasern mit den rechnerisch ermittelten Rißbreiten wird in der Tab. 7.2 gegeben.

Die Differenz der rechnerisch ermittelten gegenüber den gemessenen Rißbreiten ist unter Berücksichtigung der unvermeidlichen Ungenauigkeiten der Rißmessungen als klein zu bezeichnen.

Tab. 7.2: Gemessene und rechnerische Rißbreiten  $w_m$  für den Zugkörper ZK 9

$\sigma_{sR}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	rechn $w_m$ [mm]	gem $w_m$ [mm]
112	0,086	0,097
208	0,223	0,210
304	0,346	0,323
420	0,489	0,450

Werden die für die Meßlinien 1 und 3 bezüglich der Betrachtung der Rißbildung getroffenen Vereinbarungen auf die Schmalseiten (Meßlinien 2 und 4) übertragen, so ergeben sich angenähert dieselben Rißabstände und mittleren Rißbreiten.

Der Rißmechanismus der Zugkörper mit nur einem Bewehrungsstab unterscheidet sich recht deutlich von demjenigen, der für die Versuchskörper mit zwei Bewehrungsstäben gilt. Hier wurde verstärkt eine Rißbildung beobachtet, die von den Schmalseiten ausging, jedoch nicht in der Konsequenz wie die Ausbildung der Risse über die Breitseiten bei der anderen Gruppe von Versuchen. Auch muß die Rißbildung auf den Schmalseiten von der auf den Breitseiten getrennt behandelt werden, weil sich, wie bereits aus der Gleichung (10) zu erkennen ist, infolge der unterschiedlichen Betonüberdeckung sowohl Unterschiede im mittleren Rißabstand als auch in der mittleren Rißbreite zu erwarten sind.

Zur Klärung des Rißmechanismus werden u. a. die Verteilung der Rißbreiten  $w_i$  aller Risse auf einer Meßlinie statistisch untersucht. Es konnte hierbei festgestellt werden, daß die statistische Verteilung der Rißbreiten eine deutliche Zweigipfeligkeit aufwies. Ein sehr stark ausgeprägtes Maximum lag - auch für sehr hohe Laststufen - bei einer Rißbreite von unter 0,1 mm. In der Anlage 36 ist für den Zugkörper ZK 10 diese Gruppe von Rissen mit ausgesprochen geringer Rißbreite durch den schraffierten Bereich gekennzeichnet worden. Die Entstehung dieser Risse kann nicht allein durch die äußere Beanspruchung erklärt werden. Vielmehr scheint eine Überlagerung von inneren Schwindspannungen mit Lastspannungen die Ursache für die Risse zu sein. Da die Vielzahl dieser Risse überhaupt kein lastabhängiges Verhalten aufzeigte, es jedoch galt, den Zusammenhang zwischen äußerer Belastung und Rißbreitenentwicklung zu untersuchen, blieben diese Risse hinsichtlich ihrer Zahl ohne Berücksichtigung.

In der Anlage 36 ist auch die unter obiger Regelung gefundene mittlere Rißbreite  $w_m^{1,3}$  für den Versuchskörper eingezeichnet. Man erkennt, daß  $w_m^{1,3}$  die Rißbreitenentwicklung der lastabhän-



gigen Hauptrisse gut beschreibt und dadurch eine gute Abschätzung bezüglich des Korrosionsschutzes des schlaffen Bewehrungsstahles getroffen werden kann.

Die Anlagen 37 und 38 stellen den Zusammenhang zwischen der Summe der Rißbreiten auf den Breitseiten (ML 1,3) bzw. den Schmalseiten (ML 2,4) und der Belastung dar. Hierfür gilt im wesentlichen das gleiche, was schon für die Gruppe der Zugkörper mit zwei Stabstäben gesagt worden ist. Auffällig ist jedoch, daß die Stahlfasern die Rißbreitensumme auf den Seiten mit der größeren Betonüberdeckung (ML 2,4) besonders stark verkleinert. Diese Aussage kann später durch die Meßergebnisse für die mittlere Rißbreite bestätigt werden.

In den Anlagen 39 bis 43 sind die Entwicklung der mittleren Rißabstände  $a_m$  und die der mittleren Rißbreiten  $w_m$  der Zugkörper unterschieden nach den Meßlinienpaaren ML 1,3 bzw. ML 2,4 dargestellt. Erwartungsgemäß wurden für die Meßlinien mit der größeren Betonüberdeckung (ML 2,4) jeweils deutlich größere Rißabstände gemessen. Eine Nachrechnung des Rißabstandes bei ausgeprägtem Rißbild für den Zugkörper ZK 10 mit Hilfe der Gl. (10) nach CEB führte zu folgenden Ergebnissen:

$$\begin{aligned} \text{rechn } a_{me}^{1,3} &= 2 \left( 4,3 + \frac{20}{10} \right) + 0,25 \cdot 0,40 \cdot \frac{1,4}{0,0075} \\ &= \underline{\underline{31,3 \text{ cm}}} \end{aligned}$$

$$\text{gem } a_{me}^{1,3} = \underline{\underline{31,3 \text{ cm}}}$$

$$\begin{aligned} \text{rechn } a_{me}^{2,4} &= 2 \left( 9,3 + \frac{10}{10} \right) + 0,25 \cdot 0,40 \cdot \frac{1,4}{0,0075} \\ &= \underline{\underline{37,3 \text{ cm}}} \end{aligned}$$

$$\text{gem } a_{me}^{2,4} = \underline{\underline{45,5 \text{ cm}}}$$

Man muß bei den vorliegenden Werten von einer sehr guten bis guten Übereinstimmung sprechen, auch wenn bei einer ersten Betrachtung die Differenz der Rißabstandswerte für die Meßlinien 2 und 4 recht hoch erscheint. Es gilt jedoch zu bedenken, daß der Rißabstand bei verhältnismäßig kleiner Rißanzahl sich schon bei nur geringfügiger Rißzahländerung stark verändert.

Die Gegenüberstellung der mittleren Rißbreiten auf den Meßlinien 1 und 3 mit denen auf den Meßlinien 2 und 4 verdeutlicht (siehe Anlagen 39 - 43), daß die Rißbreiten auf den Seiten der Versuchskörper mit der geringeren Betondeckung (ML 1,3) in nahezu allen Lastbereichen kleiner ausfallen. Abweichungen hiervon treten nur in den unteren Laststufen auf und werden hauptsächlich durch die Zufälligkeit der Erstrißbildung verursacht.

Für den Zugkörper ZK 10 wurden die mittleren Rißbreiten mit der Gl. (17) nachgerechnet. Die rechnerischen Ergebnisse sind den Meßergebnissen in der Tabelle 7.3 und in der Anlage 43 gegenübergestellt.

Tab. 7.3: Gemessene und rechnerische Rißbreiten  $w_m$  für den Zugkörper ZK 10

$\sigma_{sR}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	rechn $w_m^{1,3}$ [mm]	gem $w_m^{1,3}$ [mm]	rechn $w_m^{2,4}$ [mm]	gem $w_m^{2,4}$ [mm]
169	0,056	0,120	0,081	0,230
240	0,230	0,238	0,334	0,599
304	0,361	0,358	0,525	0,906
433	0,599	0,544	0,871	1,106

Während die rechnerische Überprüfung der gemessenen Rißbreiten für die Meßlinien 1 und 3 offensichtlich eine gute Übereinstimmung erbringt, scheint die Gleichung nach CEB für die Meßlinien mit der sehr großen Betonüberdeckung (ML 2, 4;  $c = 9,3$  cm) ihre Gültigkeit zu verlieren. Dies liegt offenbar daran, daß der Zu-

sammenhang zwischen der mittleren Dehnung  $\epsilon_m$  und der Rißbreiten-  
summe wegen des starken Aufklaffens der Risse bei großer Beton-  
überdeckung nicht wie in gewählter Form darstellbar ist.

Die Anlagen 44 und 45 zeigen den Einfluß des Beanspruchungsgra-  
des  $(Z - Z^1)/Z$  auf den mittleren Rißabstand  $a_m$ . Man erkennt er-  
hebliche Unterschiede in der Lage und Art des Steilabfalles der  
Kurven. Diese Unterschiede werden sowohl von der Größe als auch  
von der Verteilung der Betonzugfestigkeit über die Längsachse  
des Zuggliedes bestimmt. Ein annähernd horizontaler Verlauf der  
Kurven (d. h. der stabilisierte Rißabstand) stellt sich ab einem  
Beanspruchungsgrad von etwa 0,35 bis 0,40 ein. Eine eindeutige  
für alle Laststufen durchgängige Abhängigkeit der Größe des Riß-  
abstandes vom Fasergehalt bzw. von der Faserart kann anhand der  
vorliegenden Meßergebnisse nicht aufgezeigt werden. Es wurden  
allerdings wie bei den Zugkörpern mit zwei Bewehrungsstäben auch  
hier für die Faserbetonkörper geringere Endrißabstände gemessen  
als für die Versuchskörper ohne Fasern.

Tab. 7.4: Gemessene Endrißabstände  $a_{me}$  bei  $\mu_s = 0,75 \%$

	gem $a_{me}^{1,3}$	gem $a_{me}^{2,4}$	Fasergehalt	Faserart
ZK 5	31,3 cm	41,6 cm	$\mu_f = 1,50 \%$	glatte Fasern
ZK 6	27,7 cm	35,7 cm	$\mu_f = 0,75 \%$	
ZK 7	20,8 cm	35,7 cm	$\mu_f = 1,50 \%$	Hakenfasern
ZK 8	26,3 cm	41,6 cm	$\mu_f = 0,75 \%$	
ZK 10	31,3 cm	45,5 cm	ohne Fasern	

Die Anlagen 46 und 47 zeigen den Zusammenhang der mittleren Riß-  
breite  $w_m$  von der bezogenen Zugkraft  $Z/As$ . Generell ist zu sa-  
gen, daß die mittlere Rißbreite auf beiden Meßlinienpaarungen  
(ML 1, 3 und ML 2, 4) mit steigender Zuglast anwächst; Abwei-  
chungen von dieser Tendenz wurden vermehrt im Bereich stark zu-  
nehmender Rißbildung - bei Lasten wenig oberhalb der Erstriß-

kraft  $Z^1$  - festgestellt. Die Beanspruchung durch fünfzig Lastwechsel führte zur Vergrößerung der Rißbreiten.

Aus der Anlage 46 ist deutlich zu erkennen, daß in nahezu allen Lastbereichen die mittlere Rißbreite  $w_m$  auf den Meßlinien 1 und 3 um so geringer ist, je höher der Fasergehalt  $\mu_f$  des betreffenden Zuggliedes ist. Gleichzeitig ist die Zunahme von  $w_m$  mit steigender Belastung um so geringer, je höher  $\mu_f$  ist. Eine Verringerung der Wirksamkeit der Fasern bezüglich der Rißbreitenreduzierung kann somit auch für große Rißbreiten in den oberen Laststufen nicht beobachtet werden.

Grundsätzlich gilt das im vorhergehenden Absatz Gesagte auch für die Rißbreiten auf den Meßlinien 2 und 4 (Anlage 47). Ergänzend ist zu bemerken, daß die Faserarmierung - und das schon bei geringen Fasermengen - sehr gut in der Lage ist, den unerwünschten Effekt der Rißaufklaffung bei extrem großen Betonüberdeckungen bzw. sehr großen Stababständen zu kompensieren. Dies ist aus dem auffällig großen Abstand der Kurven für die Faserbetonkörper zu der des Zugkörpers ohne Faserbeton zu ersehen.

Die Anlagen 48 bis 50 verdeutlichen den Einfluß des Fasergehalts  $\mu_f$  auf die mittlere Rißbreite  $w_m$ . Es sind jeweils nur die Rißbreiten auf den Meßlinien 1 und 3 aufgetragen, weil nur dort die Betondeckung für alle Zugkörper übereinstimmt. Dadurch können die Ergebnisse aller Zugglieder miteinander verglichen werden.

In der Anlage 48 sind die gemessenen mittleren Rißbreiten für eine bezogene Zugkraft von  $420 \text{ N/mm}^2$  einander gegenübergestellt. Man erkennt, daß für die gewählte Darstellungsform sich eine angenähert lineare Beziehung zwischen dem Fasergehalt und der Rißbreite für Zugglieder gleichen Bewehrungsgrades  $\mu_s$  ergibt. Für den niedrigeren Bewehrungsgrad ( $\mu_s = 0,75 \%$ ) wurde eine größere mittlere prozentuale Abnahme der Rißbreite ermittelt als für den höheren Bewehrungsgrad ( $\mu_s = 1,50 \%$ ). Erklärend sei hierzu gesagt, daß infolge der Beteiligung der Fasern an der Kraftübertragung über den Riß hinweg die tatsächliche Stahl-

spannung im Riß  $\sigma_{SR}$  bei den Zuggliedern mit nur einem Bewehrungsstab stärker vermindert wird. Gleichzeitig werden dadurch die durch Verbund vom Stahl auf den Beton zu übertragenden Kräfte und die daraus resultierenden Verbundschlupfwerte und letztlich auch die Rißbreiten verringert.

Die mittleren Rißbreiten bei bezogenen Zugkräften von  $300 \text{ N/mm}^2$  bzw.  $240 \text{ N/mm}^2$  (Anlagen 49 und 50) zeigen ein qualitativ gleiches Verhalten. Bei einer bez. Zugkraft von  $240 \text{ N/mm}^2$  (Anlage 50), und hier nur für die Versuchskörper mit einem Bewehrungsstab, ist die Abhängigkeit von  $w_m$  von dem Fasergehalt nicht einheitlich. In diesen Fällen entspricht die bezogene Zugkraft einer Last, die nur wenig über der Erstrißzugkraft  $Z^1$  liegt. Die Rißbildung befindet sich somit erst im Anfangsstadium. Die folgende Tabelle enthält eine Zusammenstellung der prozentualen Abnahme der mittleren Rißbreite in Abhängigkeit von  $\mu_s$  und  $\mu_f$  für drei ausgewählte bezogene Zugkräfte.

Tab. 7.5: Rißbreitenverringering durch Faserbewehrung, bezogen auf den nicht mit Fasern armierten Stahlbetonstab

$\mu_f$	$\mu_s$	mittlere prozentuale Reduzierung der Rißbreite durch Faserarmierung [%] bei		
[%]	[%]	$420 \text{ N/mm}^2$	$300 \text{ N/mm}^2$	$240 \text{ N/mm}^2$
1,50	1,50	35,0	38,7	47,0
	0,75	58,8	62,0	47,9
0,75	1,50	15,0	19,0	26,3
	0,75	27,7	38,8	10,3

In der Anlage 51 sind die gemessenen Rißbreiten auf den Meßlinien 1 und 3 für die Bewehrungsgrade  $\mu_s = 1,50 \%$  bzw.  $\mu_s = 0,75 \%$  aufgetragen. Man erkennt, daß bei einer vorgegebenen bezogenen Zugkraft von ca.  $420 \text{ N/mm}^2$  die mittlere Rißbreite für die nicht faserbewehrten Zugglieder bei Verringerung des Schlaffstahlgehalts deutlich ansteigt. Dies steht in Übereinstimmung mit den bekannten

Theorien zur Beschreibung des Rißverhaltens von Stahlbetonteilen. Die beiden mittleren Kurven ( $\mu_f = 0,75 \%$ ) zeigen, daß infolge der Mitwirkung der Fasern bei der Zugkraftübertragung über den Riß die Rißbreiten trotz Halbierung des Bewehrungsgrades  $\mu_s$  nicht mehr ansteigen. Bei einem Fasergehalt von  $\mu_f = 1,50 \%$  wird die Rißbreite bei den Zugkörpern mit einem Bewehrungsstab sogar reduziert, da die Fasern die im Riß vorliegende Stahlspannung  $\sigma_{sR}$  - die ja für die Rißaufweitung maßgeblich ist - erheblich herabsetzt.

Zur Klärung der Frage, ob sich Hakenfasern und glatte Fasern bezüglich der Wirksamkeit unterscheiden, sind die Rißbreiten der Zugkörper mit zwei Bewehrungsstäben in Abhängigkeit von der Faserart für zwei Lastniveaus aufgetragen worden (Anlage 52). Es zeigten sich hier geringfügig günstigere Werte für die Hakenfasern. Es muß jedoch erwähnt werden, daß dieses Verhalten nicht durch die Versuche mit dem niedrigeren Bewehrungsgrad nachgewiesen werden konnte. In diesem Zusammenhang muß noch einmal auf das Problem der Faservereinzelung hingewiesen werden. Bei den Hakenfasern konnte beobachtet werden, daß auch nach intensivem Durchmischen des Frischbetons nicht alle Verklebungen des Faserpakets gelöst waren. Damit ist der tatsächliche Verhältniswert  $l/d$  im Mittel für die Hakenfaser niedriger als der für die glatte Faser, weil der wirksame Umfang kleiner als  $\pi \cdot d$  ist. Dieser Umstand wirkt sich bezüglich des Verbunds der Faser ungünstig aus.

## 8. ZUSAMMENFASSUNG UND FOLGERUNGEN

Ziel der Forschungsarbeit war es, die Wirksamkeit einer Stahl-faserbewehrung zur Reduzierung der Rißbreiten von auf Zug beanspruchten Stahlbetonbauteilen zu klären. Hierzu wurden insgesamt zehn zentrische Zugversuche an Stahlbetonstäben mit zusätzlicher Faserarmierung durchgeführt. Dabei wurden der Einfluß des Fasergehalts  $\mu_f$ , der Faserart, des Bewehrungsgrades  $\mu_s$ , der Betonüberdeckung und der Einfluß einer schwellenden Belastung auf die Rißbildung untersucht.

Zusammenfassend lassen sich die wesentlichen Ergebnisse der Untersuchungen wie folgt darstellen:

1. Die im ungerissenen Zustand I aufnehmbaren Zugkräfte sind bei den Versuchskörpern aus Faserbeton größer als bei den Versuchskörpern ohne Faserbewehrung.
2. Die Steifigkeit der Faserbetonversuchskörper im Zustand II ist größer als die der Vergleichskörper ohne Fasern. Dies gilt für den gesamten Beanspruchungsbereich.
3. Die Mitwirkung des Betons auf Zug wird durch eine zusätzliche Faserarmierung deutlich erhöht.
4. Die Gesamtbeanspruchbarkeit eines Stahlbeton-Zuggliedes wird in Abhängigkeit vom Fasergehalt erhöht.
5. Die gemessenen Endrißabstände  $a_{me}$  der Versuchskörper aus Faserbeton sind geringer als die der Versuchskörper ohne Fasern.
6. Die mittlere Rißbreite  $w_m$  ist um so kleiner, je höher der Fasergehalt ist.

Durch diese Forschungsarbeit konnte der quantitative Einfluß einer zusätzlichen Faserarmierung auf die Rißbildung von Stahlbetonbauteilen erfaßt werden. Für die Erarbeitung von allgemeingültigen Bemessungsrichtlinien bedarf es allerdings noch zusätzlicher grundlegender Untersuchungen, die eine theoretische Erklärung der Rißbildung von faserbewehrtem Stahlbeton ermöglichen.

Maßgebend für die Breite eines Risses ist u. a. die im Riß vorherrschende Stahlspannung  $\sigma_{sR}$ . Diese Stahlspannung wird auf beiden Seiten des Risses dadurch reduziert, daß durch Verbundwirkung Zugkräfte in den den Bewehrungsstab umgebenden Beton eingeleitet werden. Die Größe des Verbundschlupfes bestimmt die Breite des Risses.

Die Versuche haben nun gezeigt, daß bei sonst gleichen Bedingungen die Rißbreite durch eine Faserzugabe reduziert wird. Dieser Effekt kann durch folgende Wirkungen erzeugt worden sein:

- a) Entlastung der Stahlspannung durch Kräfte in den Fasern über den Riß hinweg.
- b) Durchsetzung der Verbundzone um den Stab durch die Fasern mit entsprechender versteifender Wirkung.

Welche dieser Wirkungen maßgebend ist, ist noch unbekannt. Zur richtigen Wahl der Faserart, -abmessung und -zugabemenge sollte eine Klärung herbeigeführt werden.

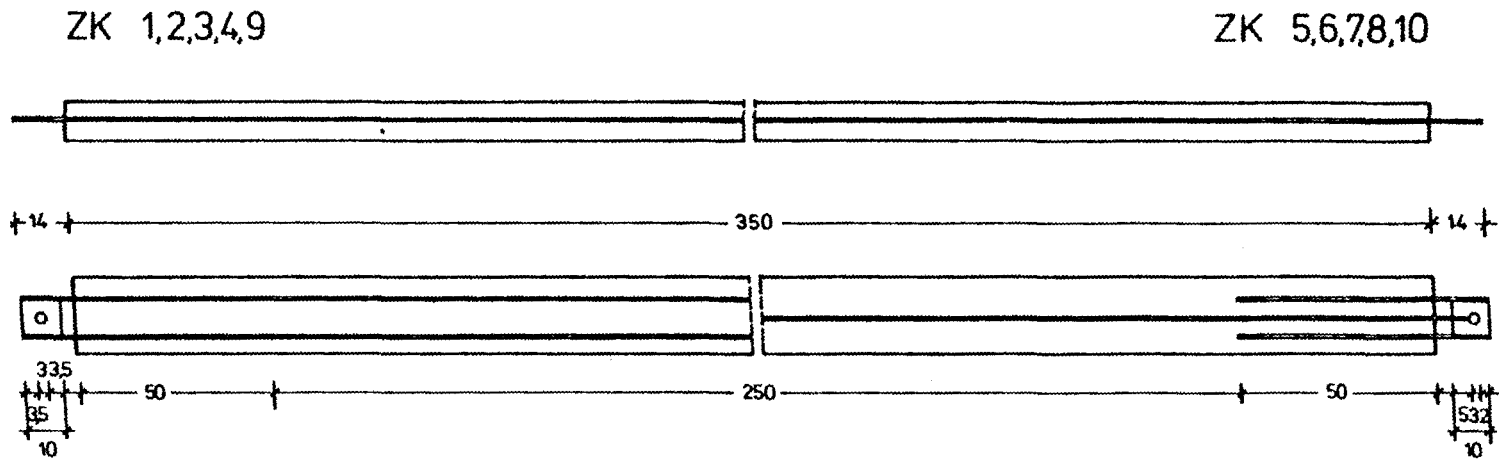
Zahlreiche Zug- und Biegezugversuche an unbewehrtem Faserbeton haben gezeigt, daß die Fasern in der Lage sind, Kräfte über Risse hinweg zu übertragen. Diese Beobachtungen können durch die Ergebnisse der hier berichteten Forschungsarbeit bestätigt werden. Es kann somit davon ausgegangen werden, daß infolge Mitwirkung der Fasern an der Zugkraftübertragung über den Riß hinweg die Spannungen in der Bewehrung verringert werden.



Inwieweit Stahlfasern die Verbundeigenschaften von Bewehrungsstäben in Faserbeton verbessern, ist weitgehend unbekannt. Es ist jedoch damit zu rechnen, daß die Verbundsteifigkeit durch eine Faserarmierung erhöht werden kann, weil die Aufweitung der Mikrorisse im Bereich der Querrippen des Bewehrungsstabes durch die Fasern behindert wird. Zur Absicherung dieser Annahme wären eingehende Untersuchungen des Verbundverhaltens von gerippten Bewehrungsstäben in faserarmiertem Normalbeton wünschenswert. Mit Hilfe derartiger Untersuchungen, deren Förderung durch Mittel des Niedersächsischen Zahlenlottos die Verfasser beantragen werden, wird es möglich, das wirklichkeitsnahe Trag- und Verformungsverhalten zu formulieren und somit einen Beitrag zur wirtschaftlichen Bemessung von Stahlbetonbauteilen mit Faserarmierung zu leisten.

## 9. LITERATUR

- [1] Swamy, R.N.: Fibre Reinforcement of Cement and Concrete.  
Vol. 8 - No. 45 - Materiaux et Construction (1975).
- [2] Wischer, G.: Faserbewehrter Beton. beton, Herstellung und Verwendung 24 (1974).
- [3] Rao, S.: Umlagerung der Schnittkräfte in Stahlbetonkonstruktionen, Grundlagen der Berechnung bei statisch unbestimmten Tragwerken unter Berücksichtigung der plastischen Verformungen. DAfStb Heft 177, (1966).
- [4] Rostásy, F.S. und Alda, W.: Rißbildung und Dehnsteifigkeit von Stahlleichtbetonstäben unter zentrischem Zwang. Versuchsbericht vom Otto-Graf-Institut, Stuttgart, (1975).
- [5] Shah, S.P.; Stroeven, P.; Dalhuisen, D. und van Steckelenburg, P.: Complete stress-strain curves for steel fibre reinforced concrete in uniaxial tension and compression. Proc. RILEM Symp., Testing and Test Methods of Fibre Cement Composites, Sheffield, 1978. The Construction Press (1978).
- [6] Falkner, H.: Zur Frage der Rißbildung durch Eigen- und Zwängspannungen infolge Temperatur in Stahlbetonbauteilen. DAfStb Heft Nr. 208 (1969).
- [7] CEB/FIP-Mustervorschrift für Tragwerke aus Stahlbeton und Spannbeton, 3. Ausgabe, (1978).
- [8] Rostásy, F.S.: Zwang und Rissebeschränkung bei Außenwänden aus Stahlleichtbeton. Habil.-Schrift, TH Stuttgart, (1975).



Längsschnitte  
Bewehrungsstäbe  $\phi$  14 mm



Querschnitte  
im Bereich der Meßlänge  $l_0 = 250$  cm

Längs- und Querschnitte der Versuchskörper

ZK 1+2		Durchgang in Gew.-% des Gemisches							
Korngruppe	%	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	31,5
0/1	10	4,2	8,9	9,7	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
0/2	30	0,7	8,0	23,0	28,9	30,0	30,0	30,0	30,0
2/8	50	0,6	1,3	2,1	2,7	13,5	45,0	50,0	50,0
8/16	10	0,1	0,3	0,4	0,4	0,5	0,9	8,3	10,0
Summe	100	5,6	18,5	34,2	41,9	54,0	85,9	98,3	100,0

ZK 3+4		Durchgang in Gew.-% des Gemisches							
Korngruppe	%	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	31,5
0/1	10	4,2	8,9	9,7	9,9	10,0	10,0	10,0	10,0
0/2	30	0,7	8,0	23,0	28,9	30,0	30,0	30,0	30,0
2/8	50	0,3	0,4	0,5	0,9	5,4	46,2	50,0	50,0
8/16	10	0,2	0,6	0,8	1,0	1,1	1,4	8,6	10,0
Summe	100	5,4	17,9	34,0	40,7	46,5	87,6	98,6	100,0

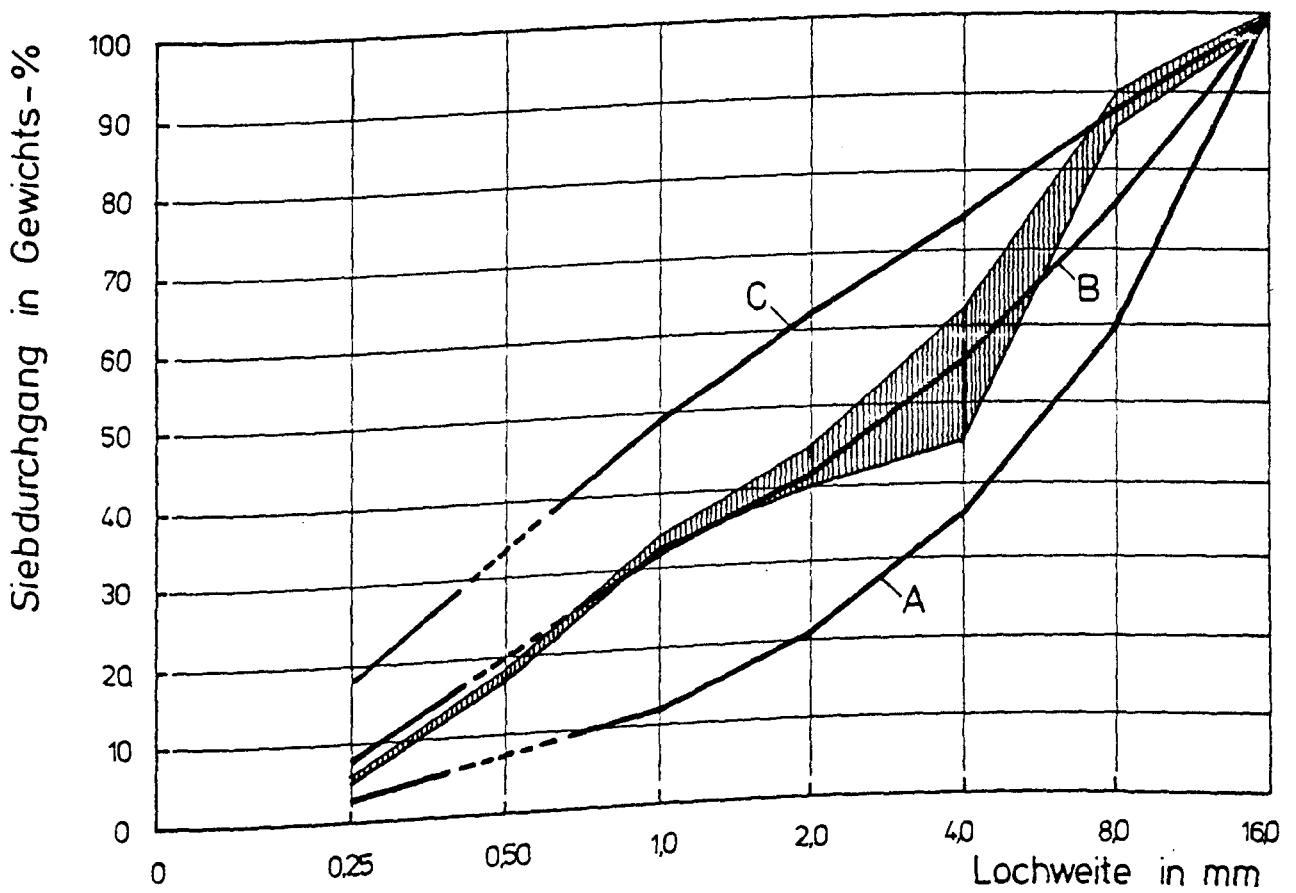
Kornzusammensetzung der Versuchskörper ZK 1 bis 4

ZK 5+6		Durchgang in Gew.-% des Gemisches							
Korngruppe	%	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	31,5
0/1	10	4,2	8,9	9,7	9,9	10,0	10,0	10,0	10,0
0/2	30	0,7	8,0	23,0	29,0	30,0	30,0	30,0	30,0
2/8	50	0,3	0,4	0,5	0,9	5,4	46,2	50,0	50,0
8/16	10	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,6	8,6	10,0
Summe	100	5,3	17,4	33,4	40,0	45,7	86,8	98,6	100,0

ZK 7+8		Durchgang in Gew.-% des Gemisches							
Korngruppe	%	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	31,5
0/1	10	3,8	8,4	9,6	9,8	9,9	10,0	10,0	10,0
0/2	30	0,7	8,0	23,0	29,0	30,0	30,0	30,0	30,0
2/8	50	0,4	0,8	1,9	6,3	22,3	49,3	50,0	50,0
8/16	10	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,6	8,6	10,0
Summe	100	5,0	17,3	34,7	45,3	62,5	89,9	98,6	100,0

Kornzusammensetzung der Versuchskörper ZK 5 bis 8

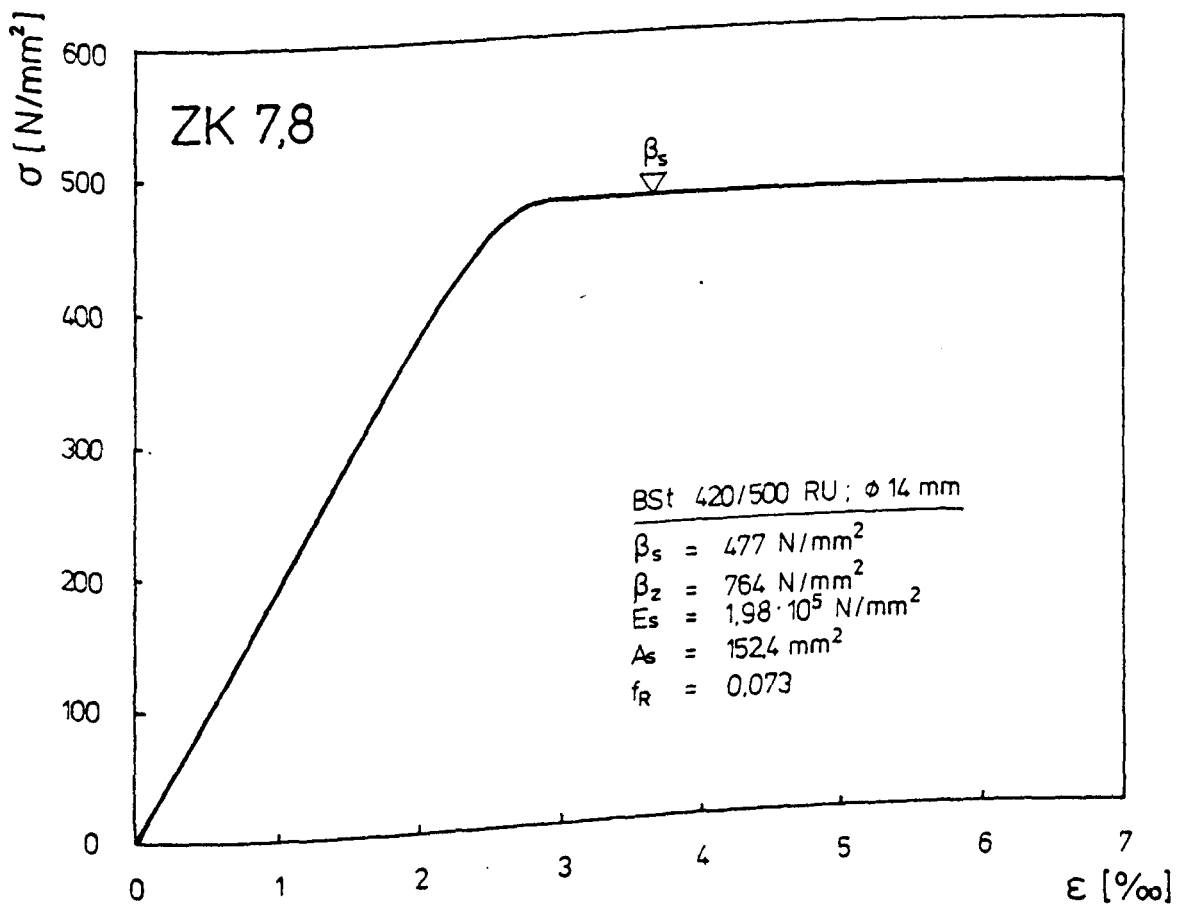
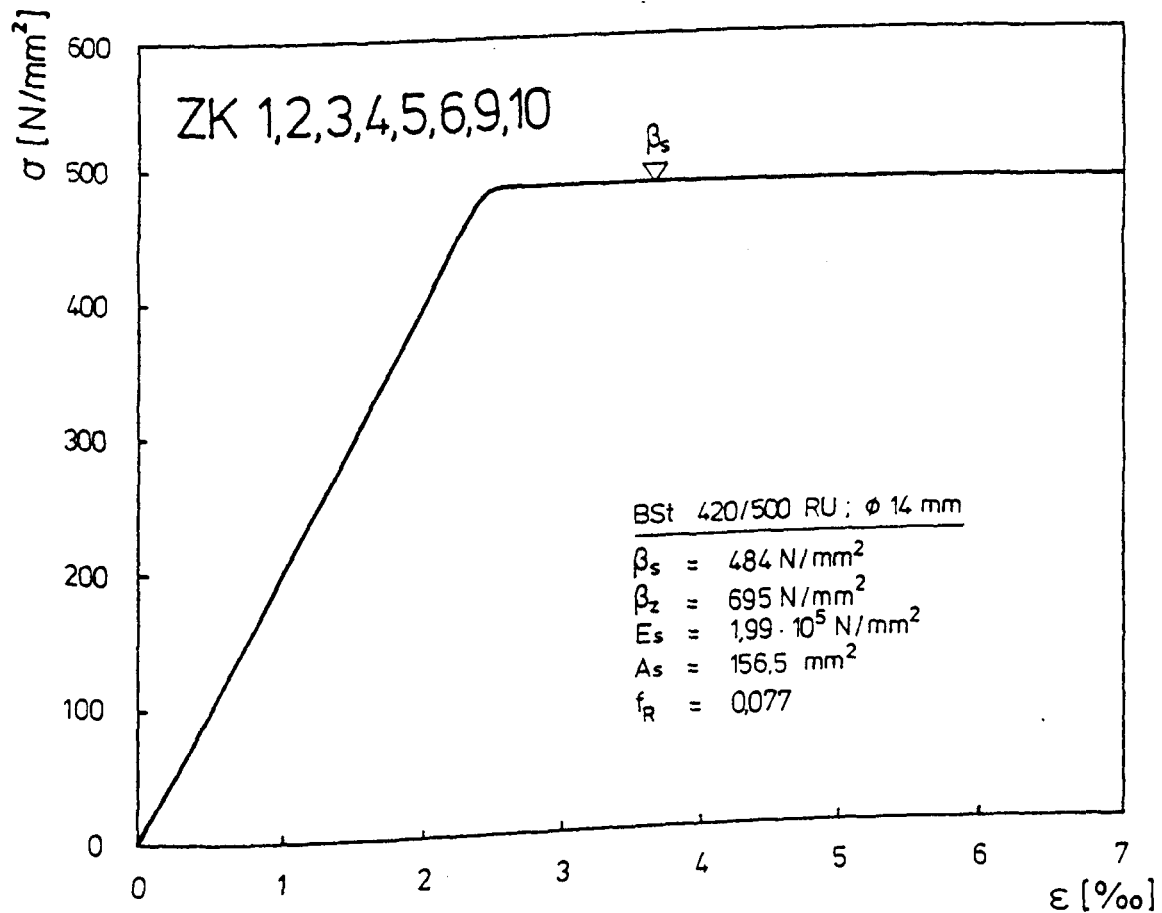
ZK 9+10		Durchgang in Gew.-% des Gemisches							
Korngruppe	%	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	31,5
0/1	11,1	4,7	9,9	10,8	11,0	11,1	11,1	11,1	11,1
0/2	29,6	0,7	7,8	22,7	28,5	29,6	29,6	29,6	29,6
2/8	49,4	0,2	0,3	0,5	0,9	5,3	45,6	49,4	49,4
8/16	9,9	0,2	0,6	0,8	1,0	1,1	1,4	8,6	9,9
Summe	100	5,8	18,6	34,8	41,4	47,1	37,7	98,7	100,0



Kornzusammensetzung der Versuchskörper ZK 9 und 10

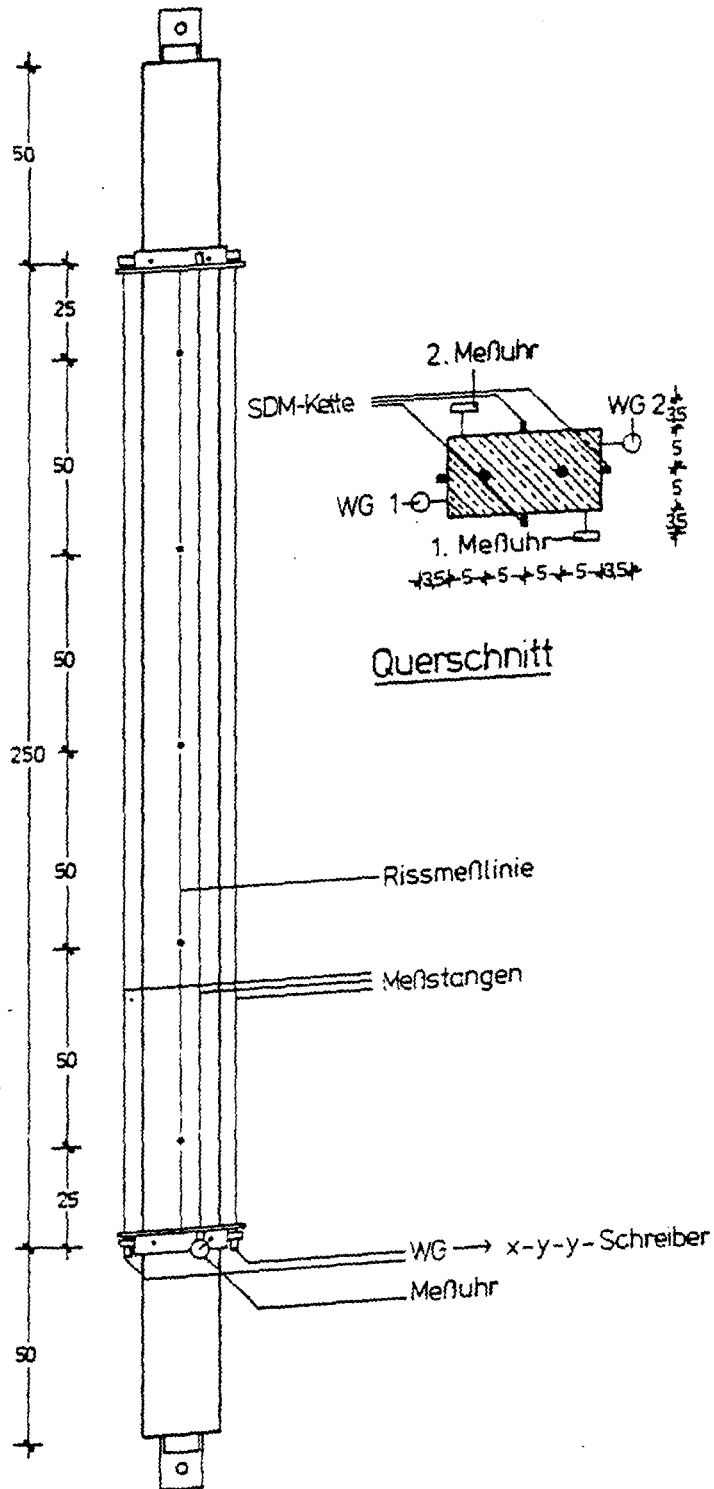
Probenbez.	Fasergehalt [Vol. %] Faserart	Alter [d] Anz. d. Proben	$\beta_W$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Alter [d] Anz. d. Proben	$\beta_{SZ}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Alter [d] Anz. d. Proben	$\beta_{bZ}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\beta_{bZ}^{ZK}$
ZK 1	1,50 —	37/2	44,0	-	-	38-39/3	2,38	1,355
ZK 2	0,75 —	37/2	42,0	39/1	2,78	39/2	2,39	1,301
ZK 3	1,50 —	36/2	46,0	41/2	3,70	41/1	2,24	1,243
ZK 4	0,75 —	42/2	48,0	42/2	3,04	42/1	2,16	1,270
ZK 5	1,50 —	29/2	45,5	29/2	3,86	29/1	2,41	1,622
ZK 6	0,75 —	35/2	45,5	35/2	3,68	-	-	1,537
ZK 7	1,50 —	28/2	42,0	29/2	3,01	29/1	1,88	1,326
ZK 8	0,75 —	32/2	43,0	32/2	2,76	32/1	2,08	1,374
ZK 9	-	35/3	40,0	35/2	2,89	35/1	1,88	0,936
ZK10	-	41/3	41,0	41/2	2,54	41/1	2,13	1,111
							$\bar{\beta}_{bZ} = 2,172$	1,183
							$\frac{\bar{\beta}_{bZ}^{ZK}}{\bar{\beta}_{bZ}} = 0,545$	

Zusammenstellung der Betonfestigkeiten bei Prüfbeginn



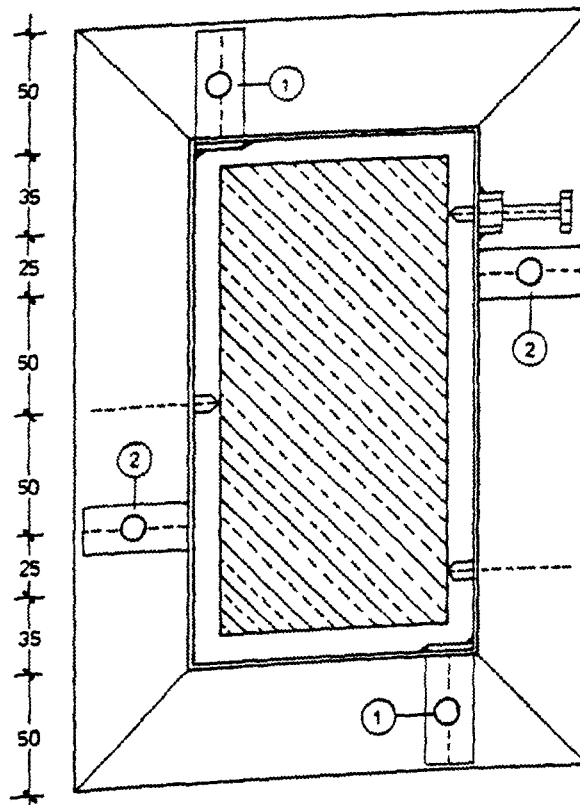
Mechanische Kennwerte der Betonstähle



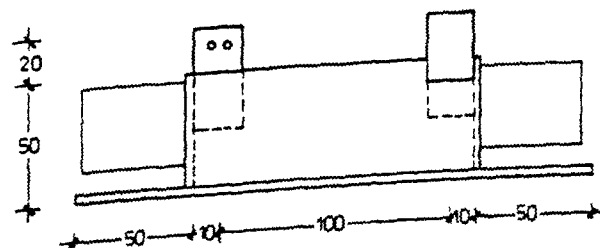


Ansicht

Versuchskörper mit Meßsystem

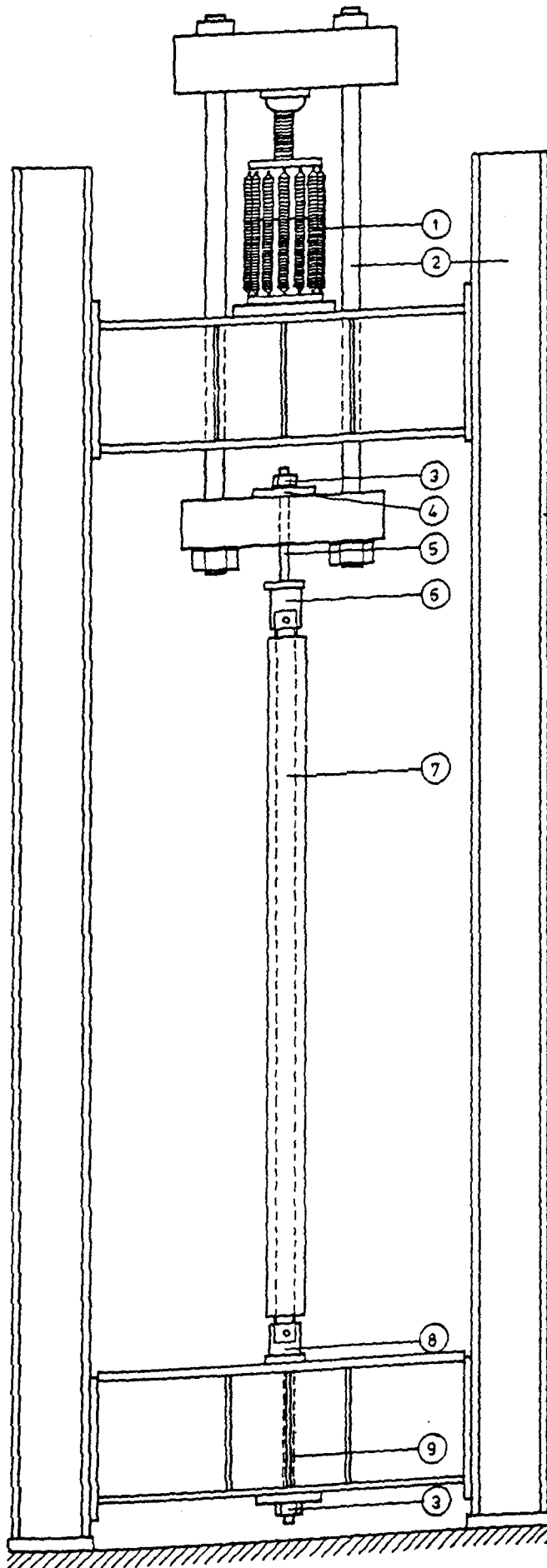


- ① Aufnehmer WG
- ② Aufnehmer Uhr



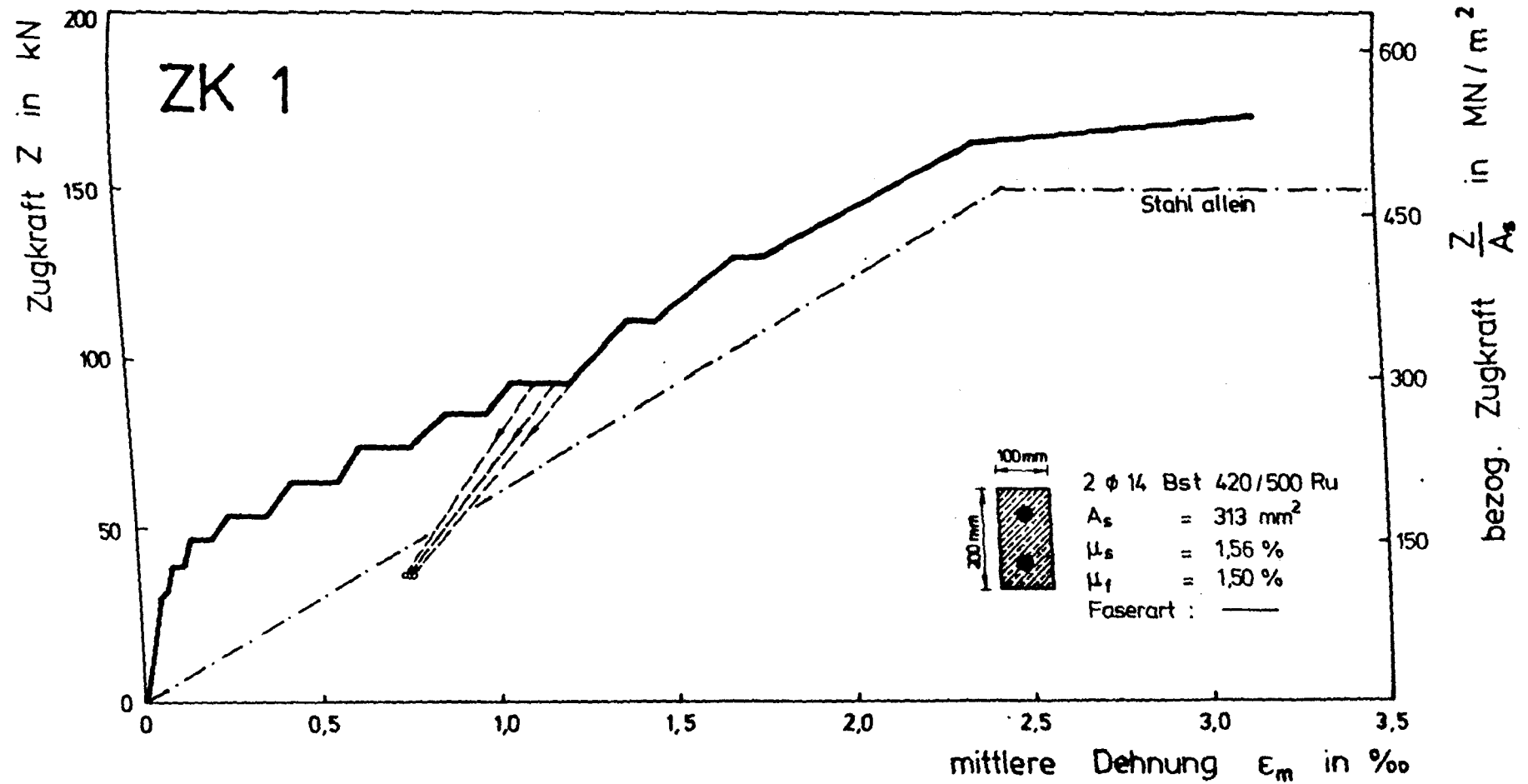
Profil : L 50 St 37

Meßrahmen für Dehnungsmessung

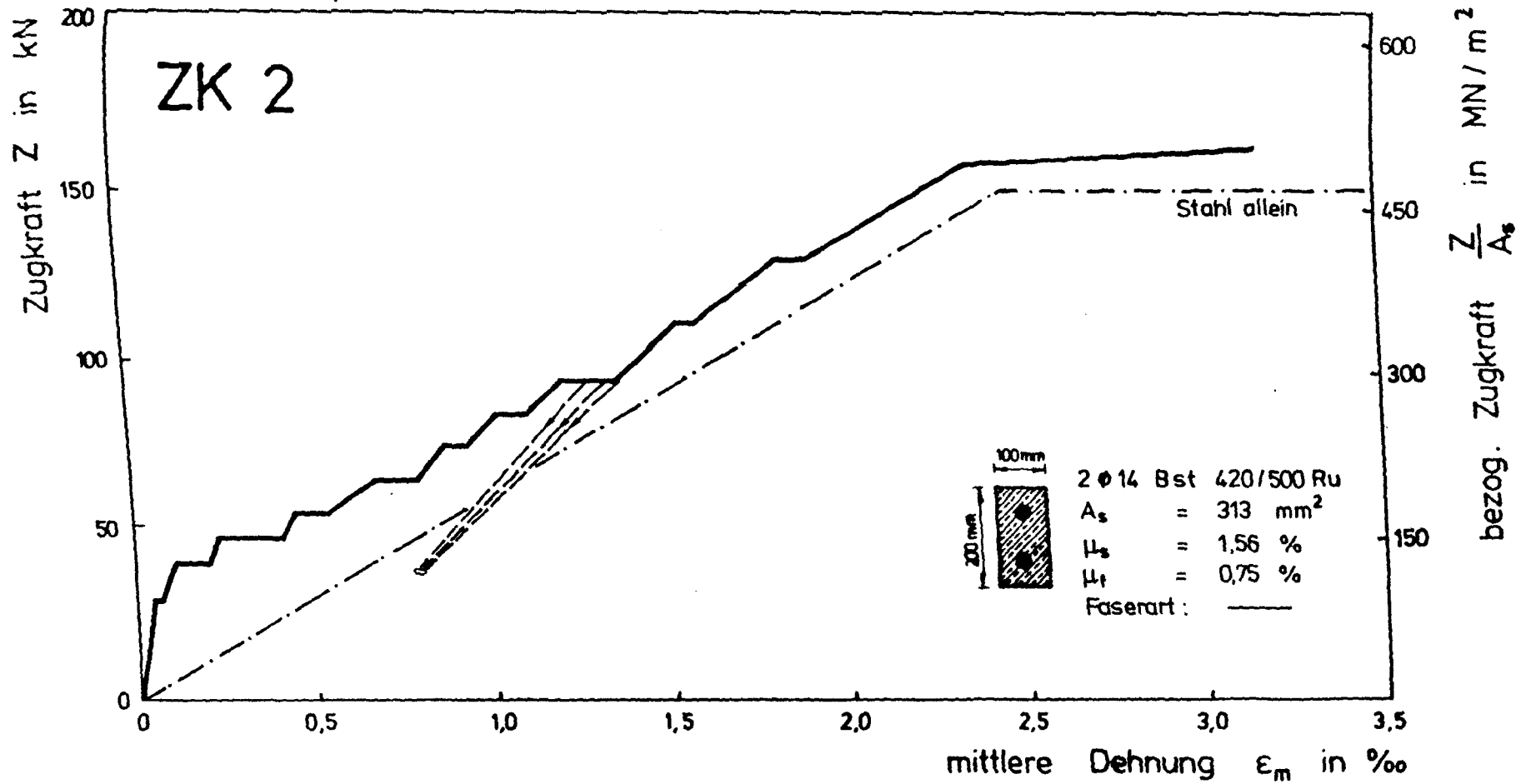


- ① Zylinder
- ② Prüfraumen
- ③ Ankermutter
- ④ Ankerplatte
- ⑤ obere Zugstange
- ⑥ obere Einspannvorrichtung
- ⑦ Probe : Zugkörper
- ⑧ untere Einspannvorrichtung
- ⑨ untere Zugstange

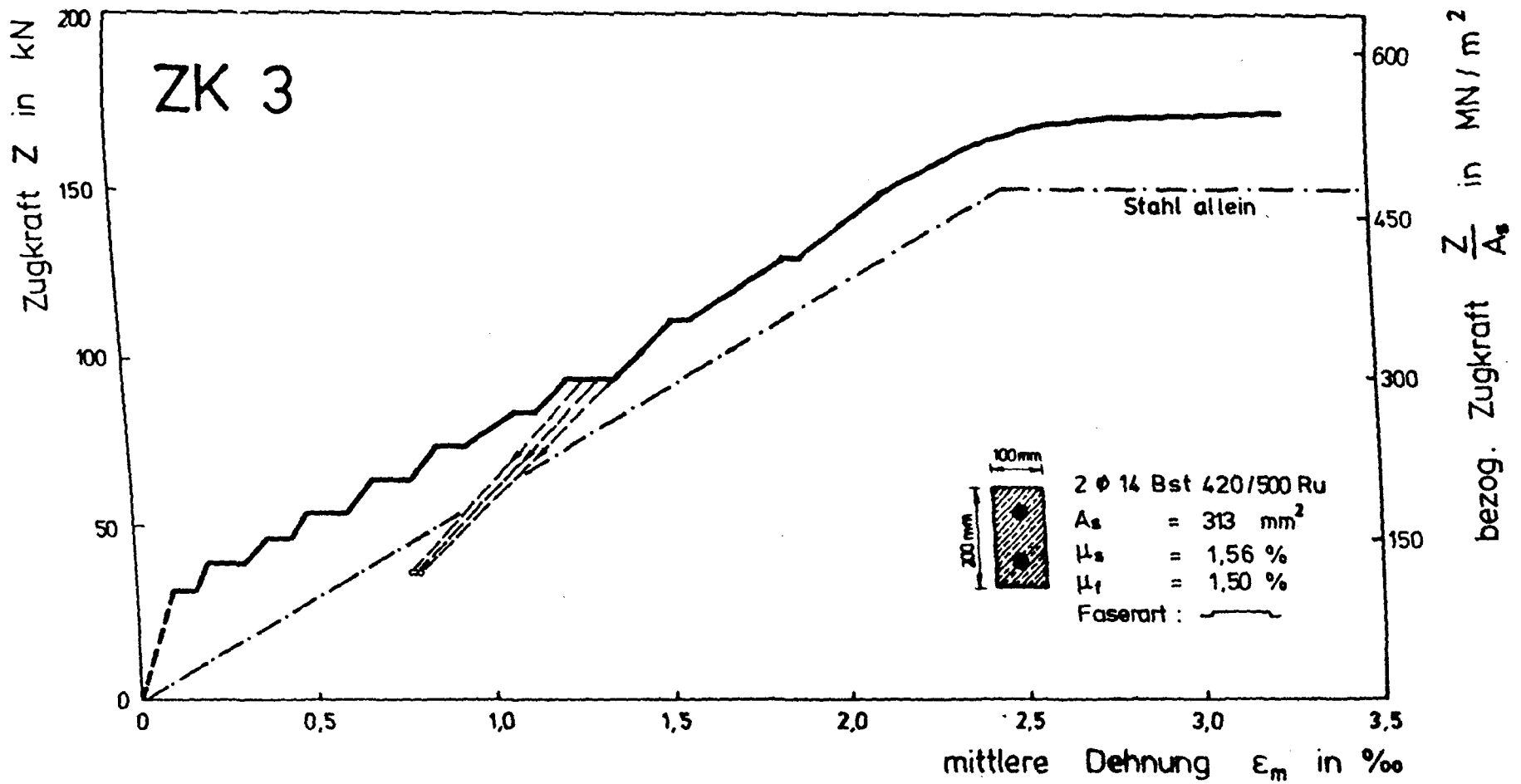
Prüfraumen mit Versuchskörper



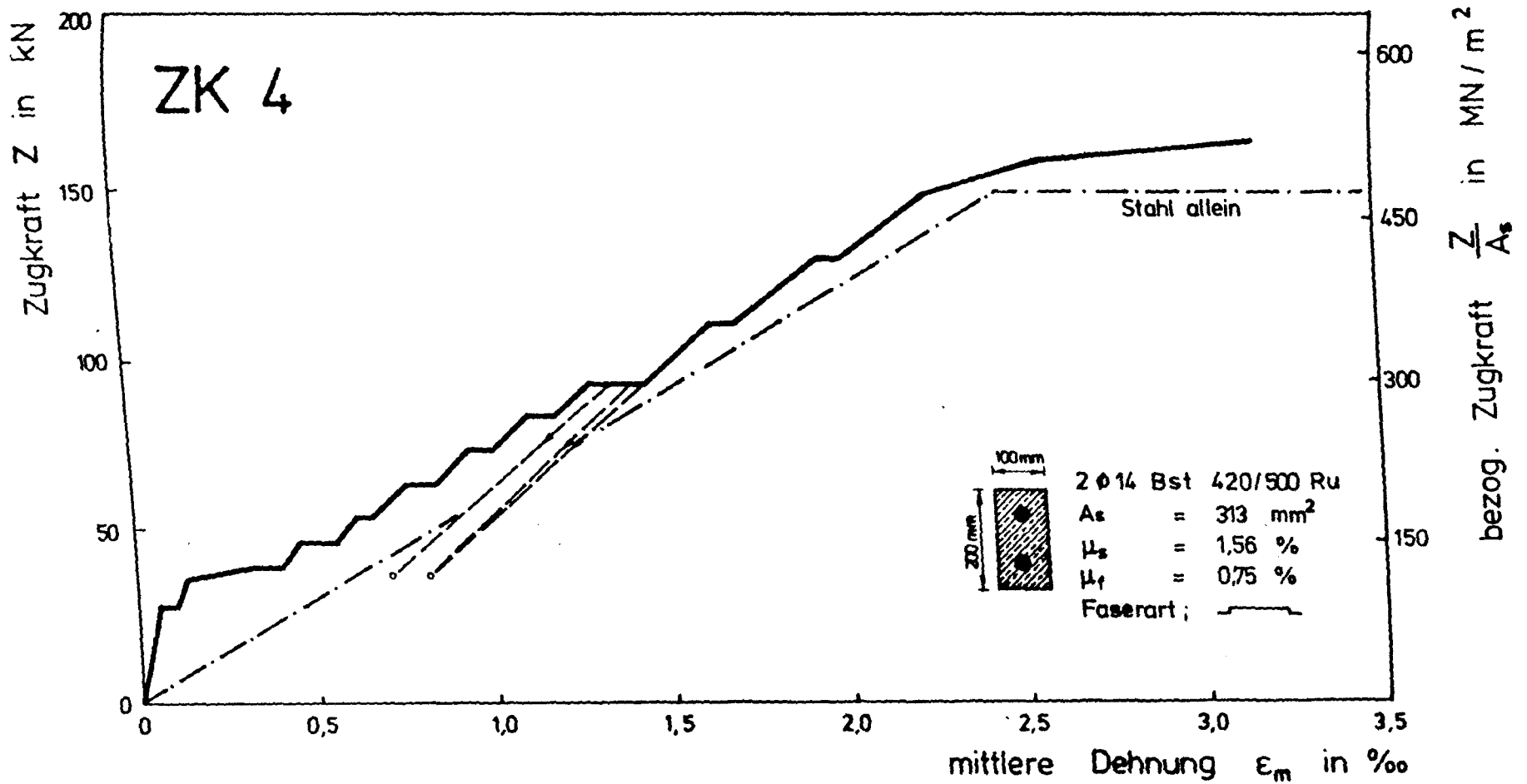
Mittlere Dehnung vom Zugkörper ZK 1 in Abhängigkeit von der Belastung



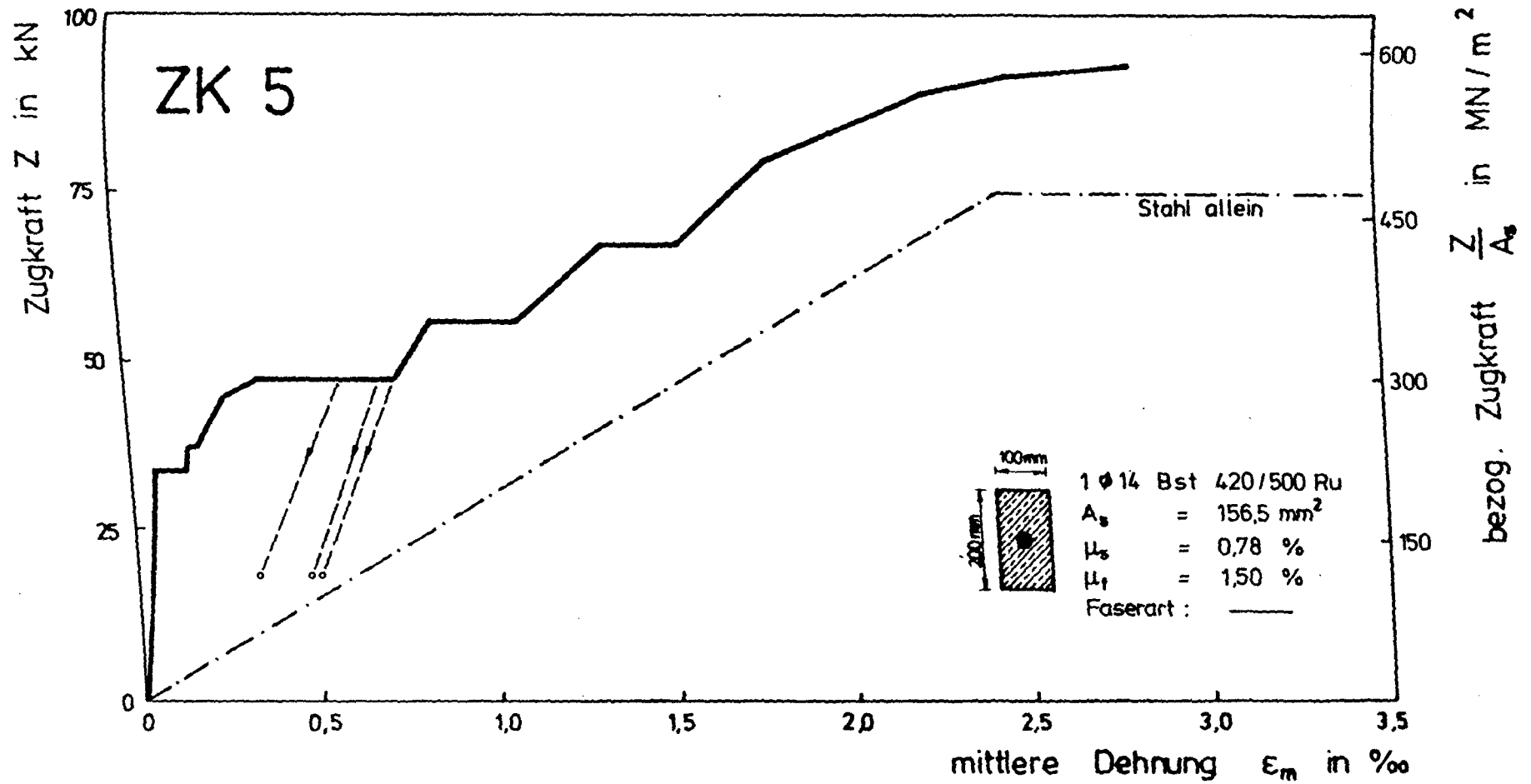
Mittlere Dehnung vom Zugkörper ZK 2 in Abhängigkeit von der Belastung



Mittlere Dehnung vom Zugkörper ZK 3 in Abhängigkeit von der Belastung

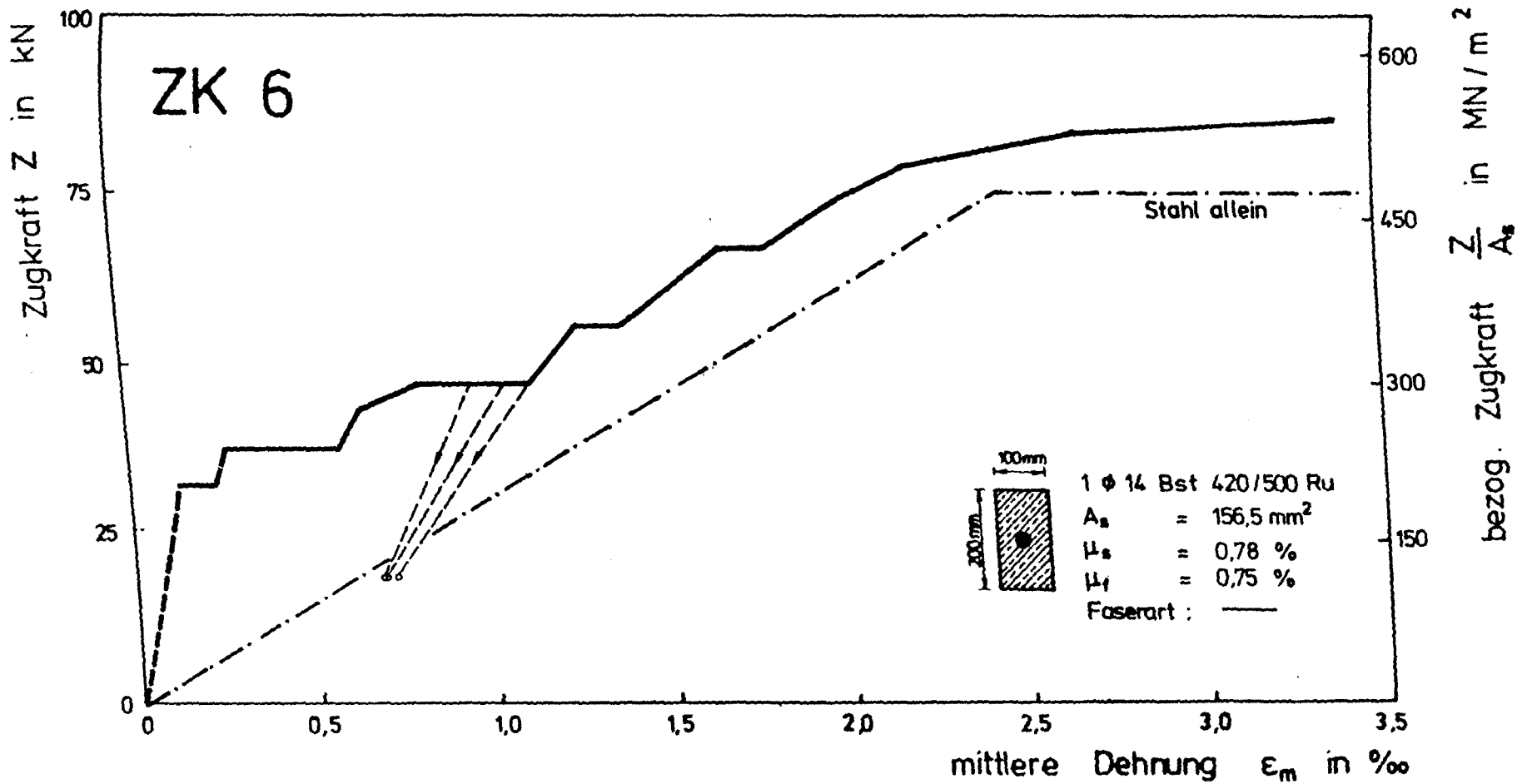


Mittlere Dehnung vom Zugkörper ZK 4 in Abhängigkeit von der Belastung

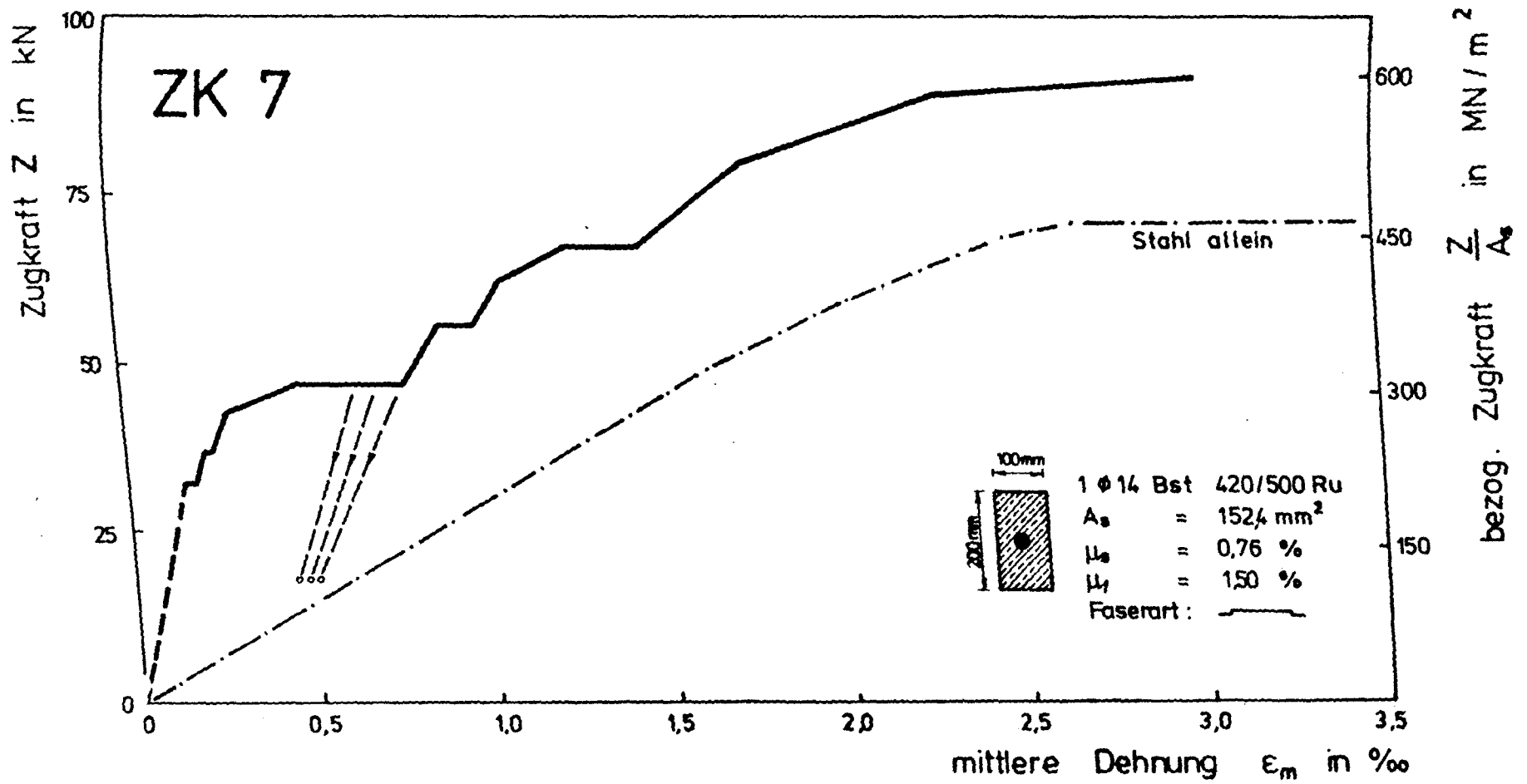


Mittlere Dehnung vom Zugkörper ZK 5 in Abhängigkeit von der Belastung

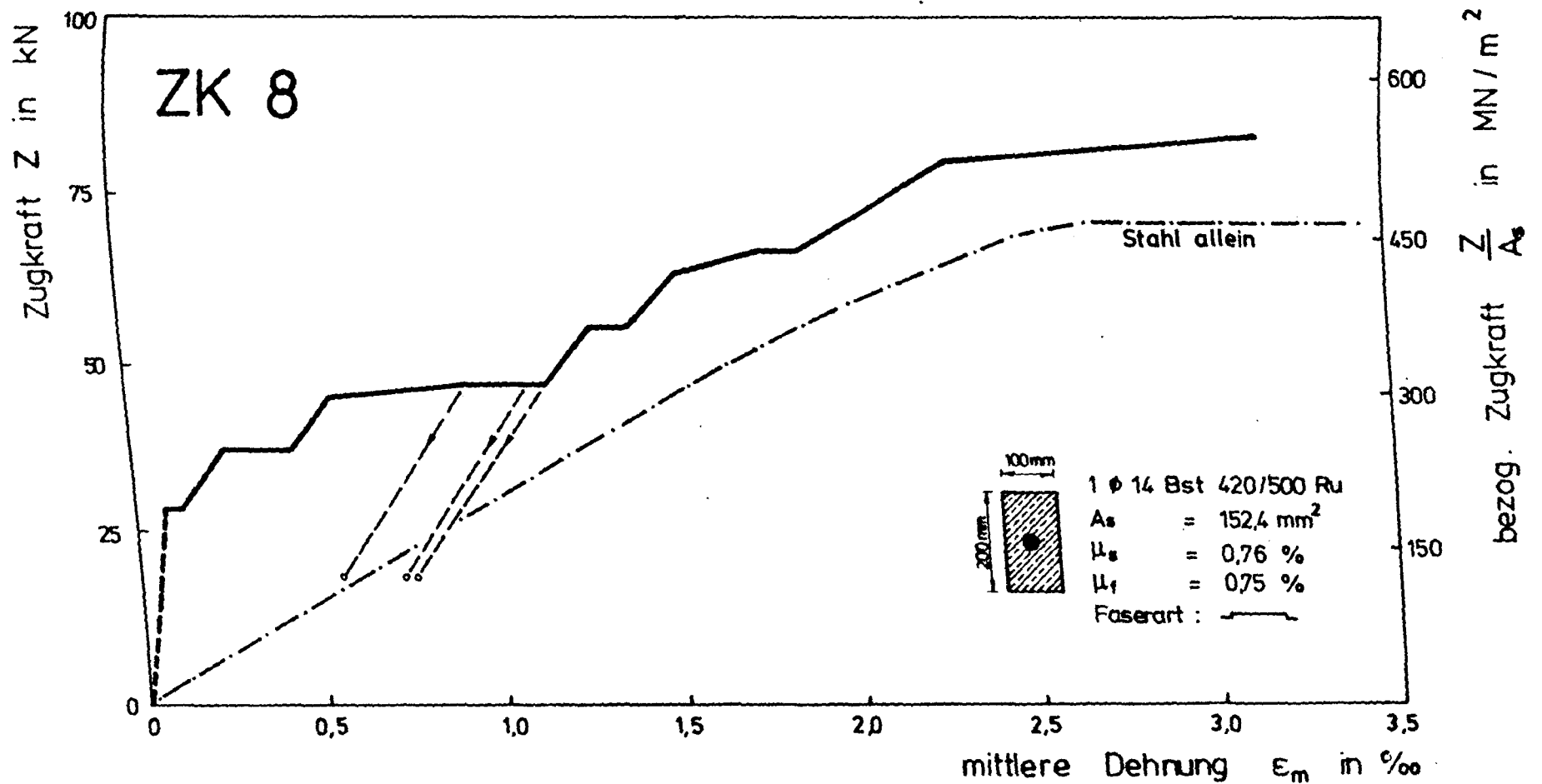




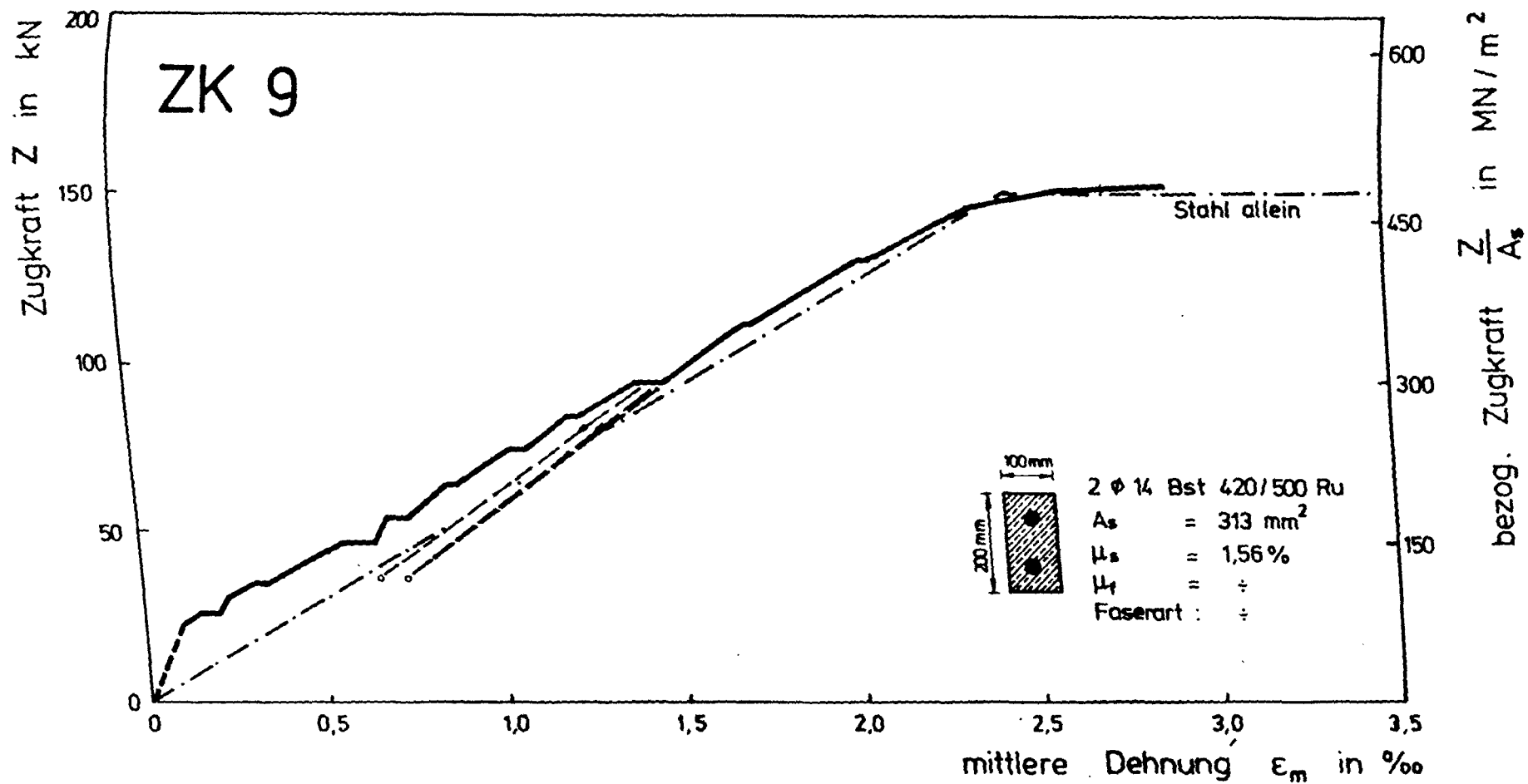
Mittlere Dehnung vom Zugkörper ZK 6 in Abhängigkeit von der Belastung



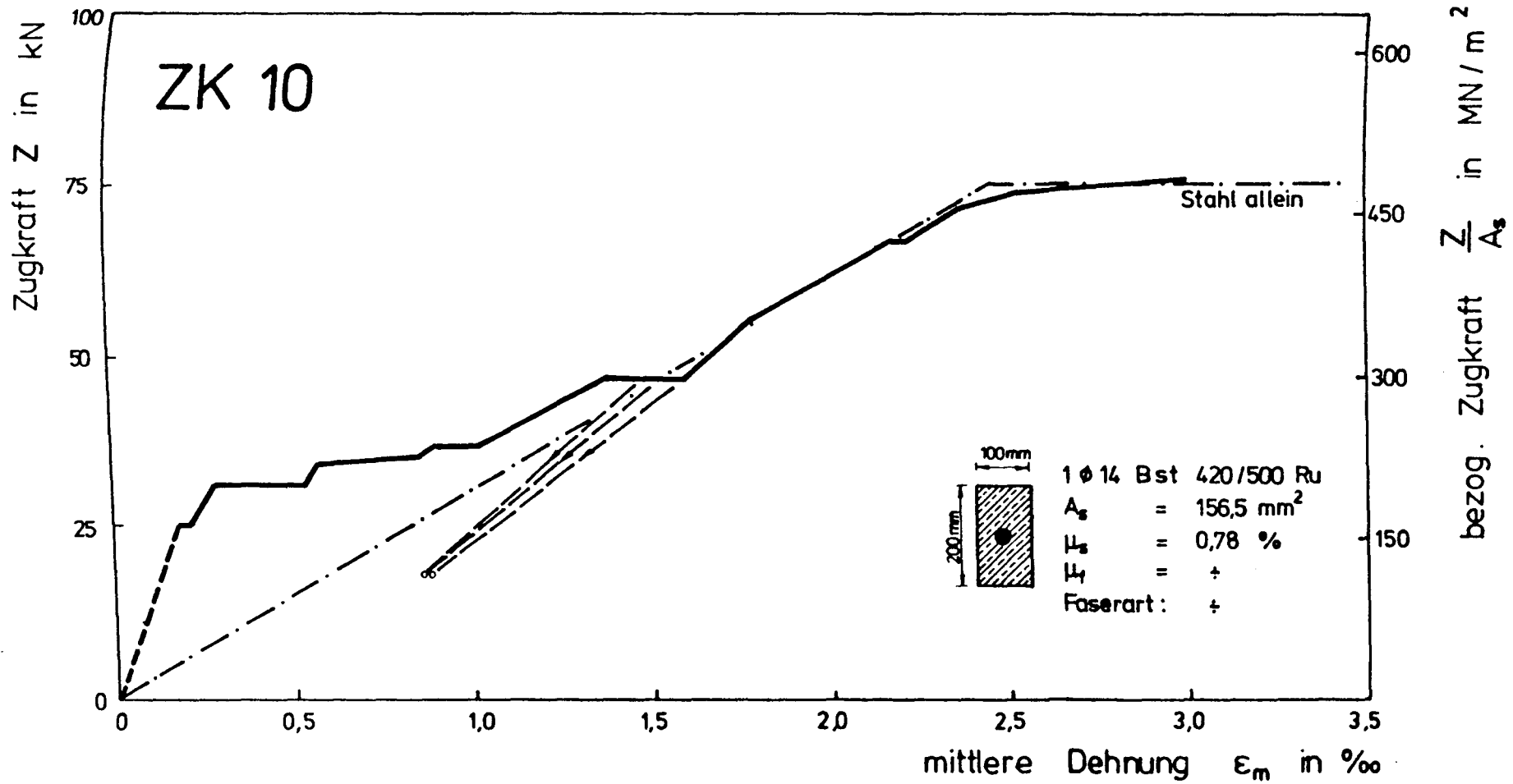
Mittlere Dehnung vom Zugkörper ZK 7 in Abhängigkeit von der Belastung



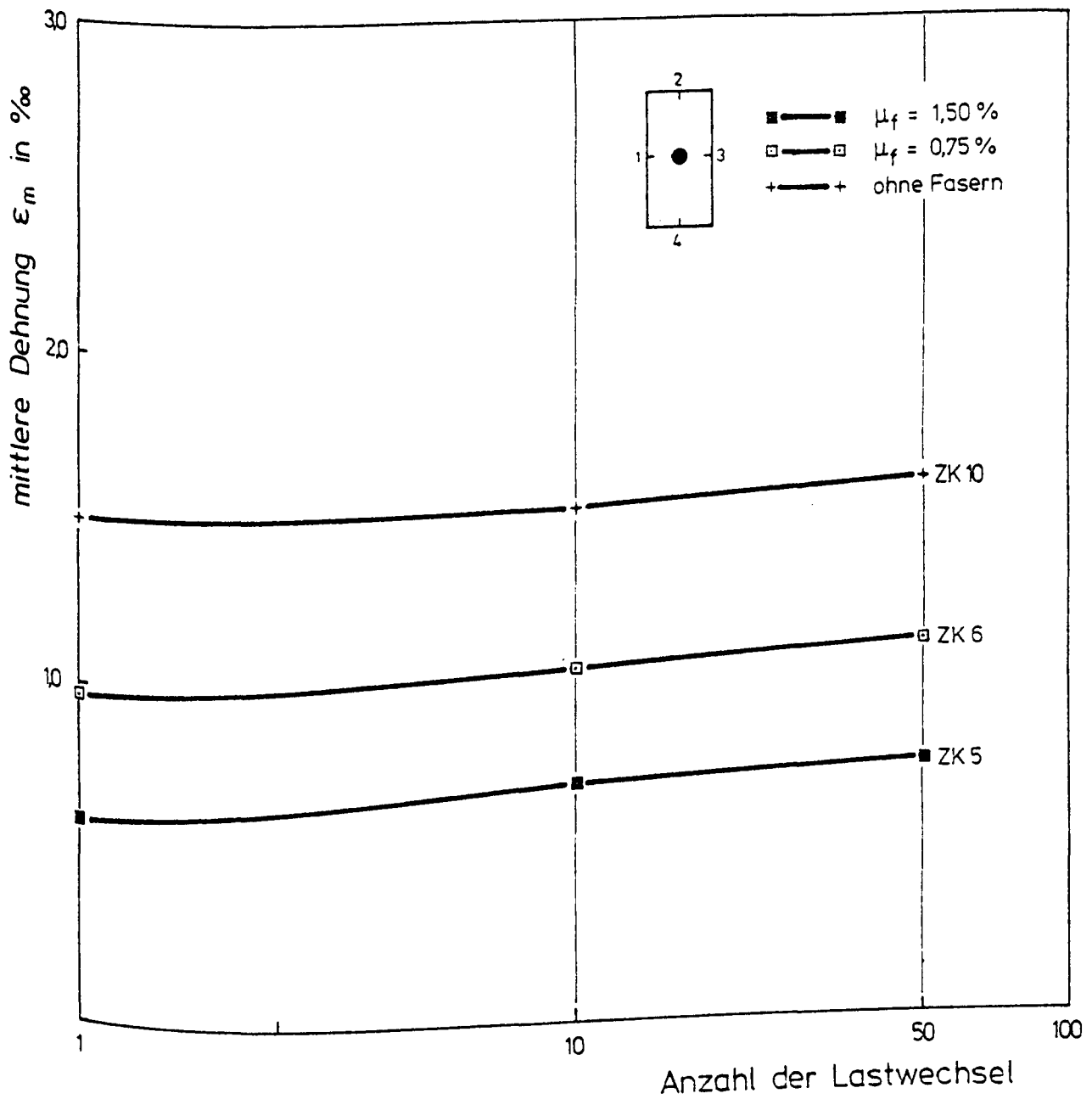
Mittlere Dehnung vom Zugkörper ZK 8 in Abhängigkeit von der Belastung



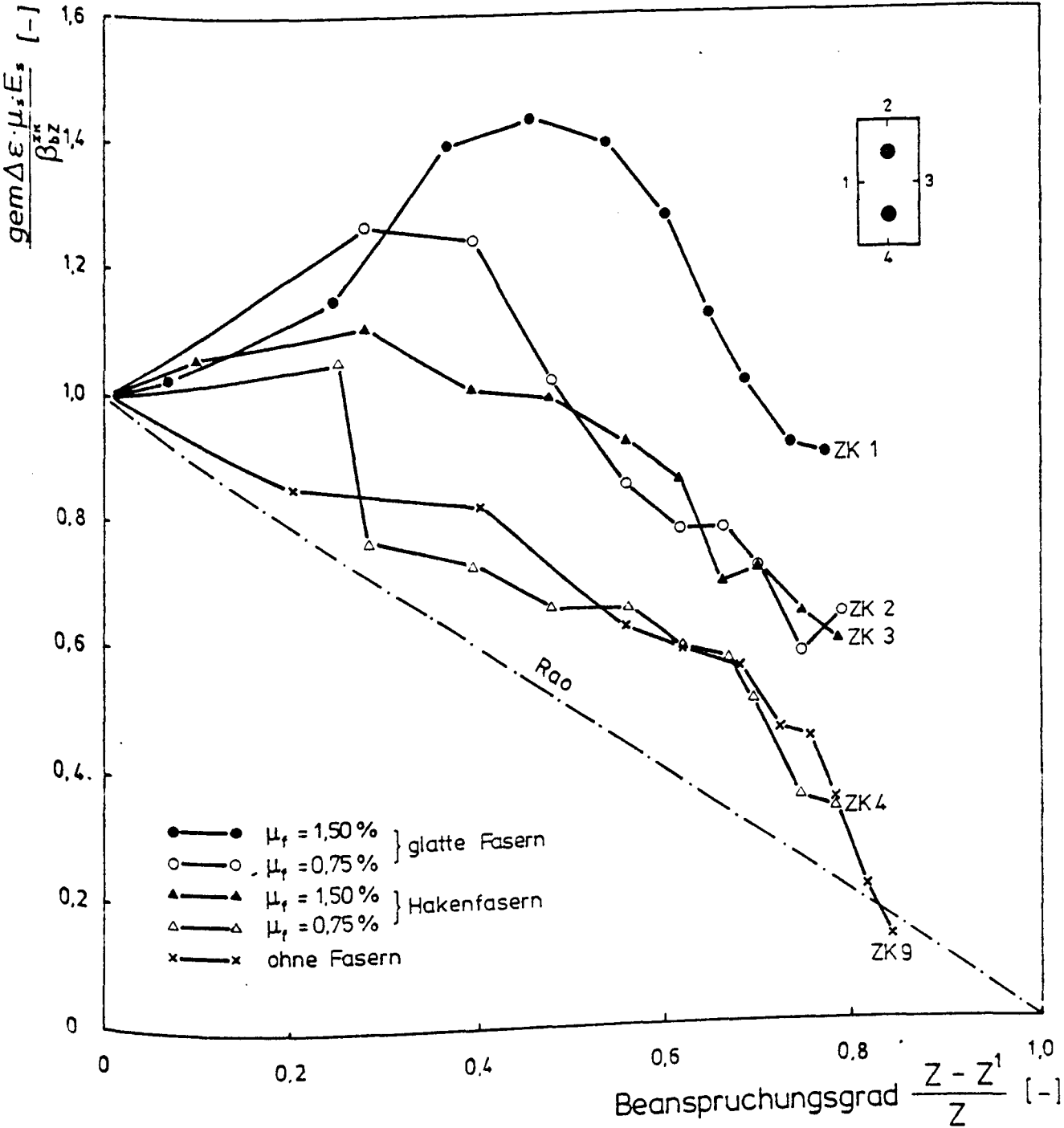
Mittlere Dehnung vom Zugkörper ZK 9 in Abhängigkeit von der Belastung



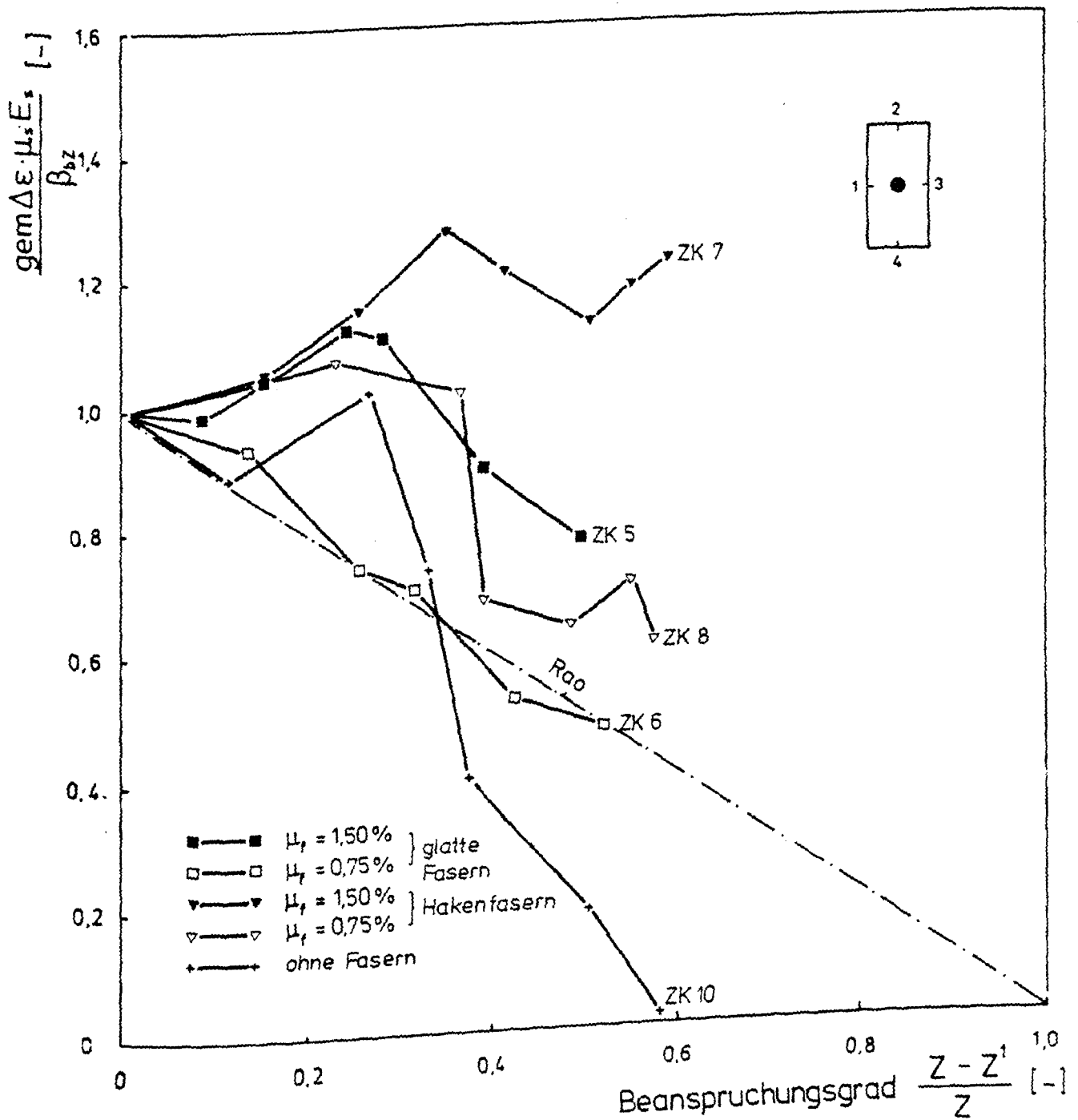
Mittlere Dehnung vom Zugkörper ZK 10 in Abhängigkeit von der Belastung



Dehnungszunahme infolge schwellender Belastung

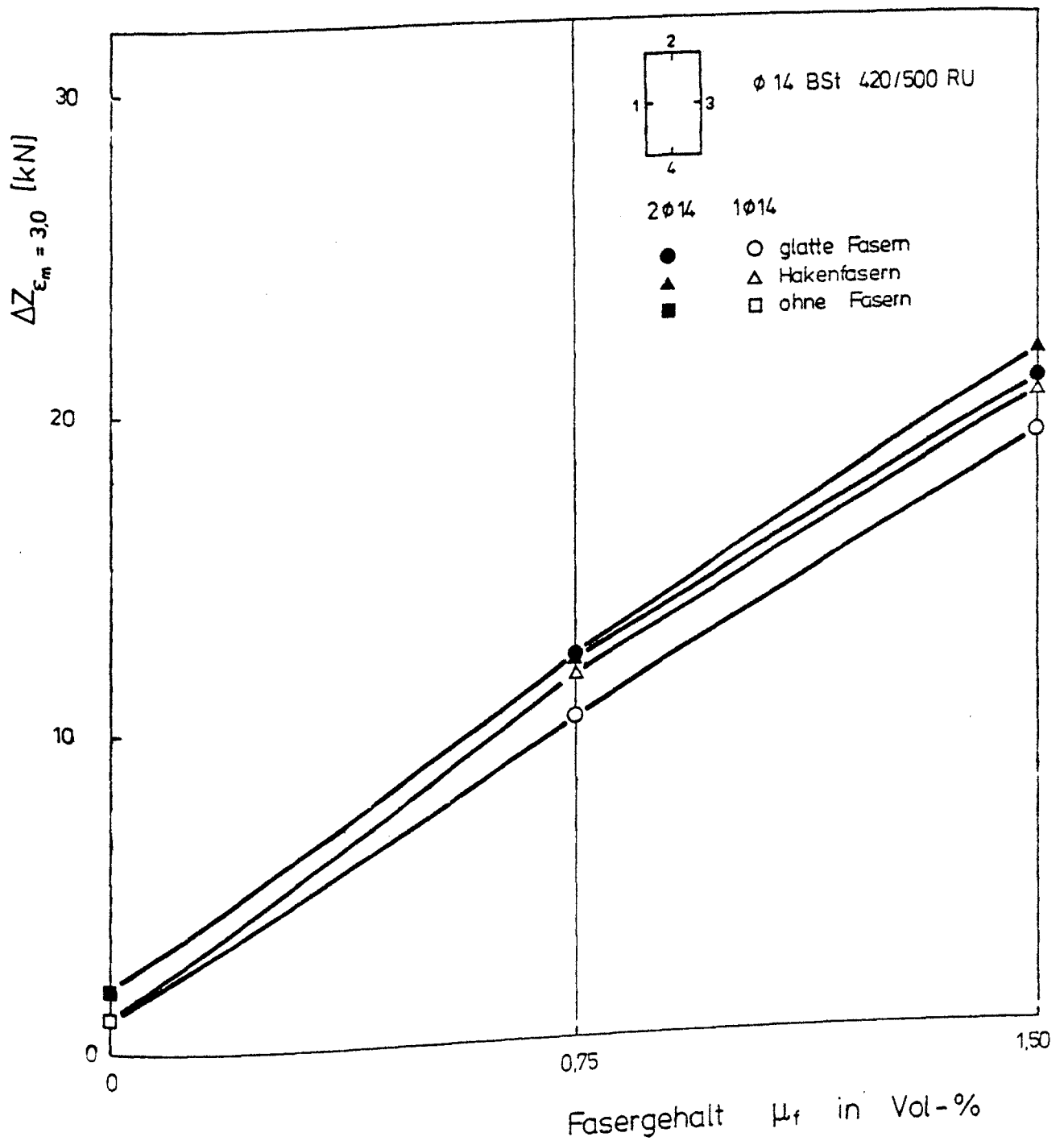


Gemessene Mitwirkung des Betons auf Zug und theoretische Kurve nach RAO [3] bei  $\mu_f = 1,50\%$



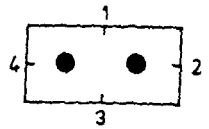
Gemessene Mitwirkung des Betons auf Zug und theoretische Kurve nach RAO [3] bei  $\mu_f = 0,75 \%$





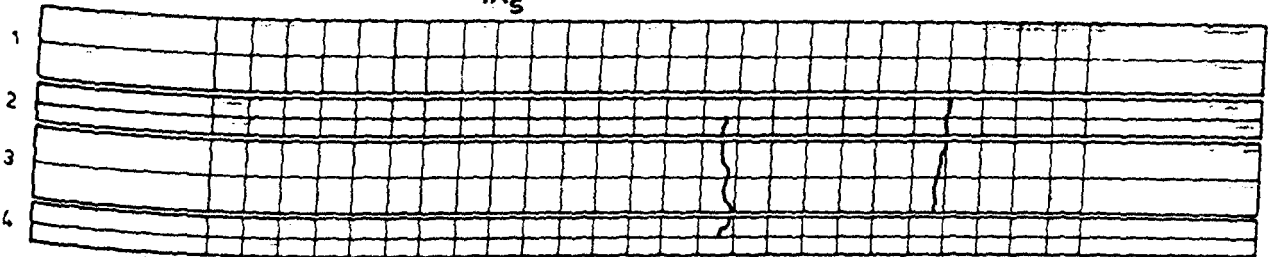
Gemessene Differenzkräfte bei einer Dehnung von  $\epsilon_m = 3,0 \%$   
in Abhängigkeit vom Fasergehalt

ZK 1



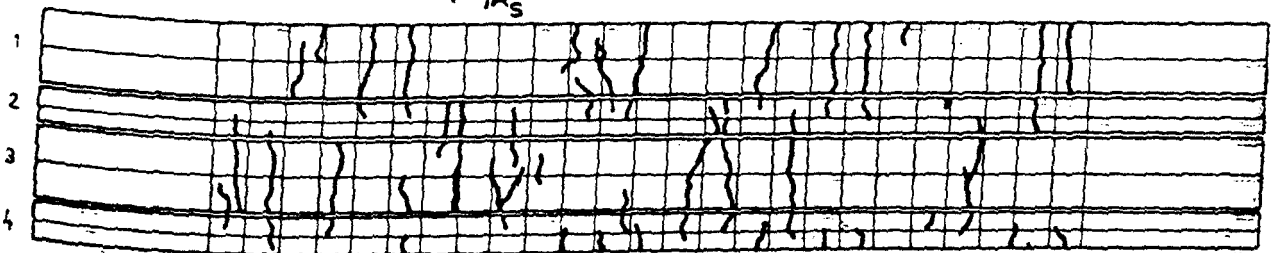
LS : 47,5 kN

$$(\sigma_{A_s} = 104 \text{ N/mm}^2)$$



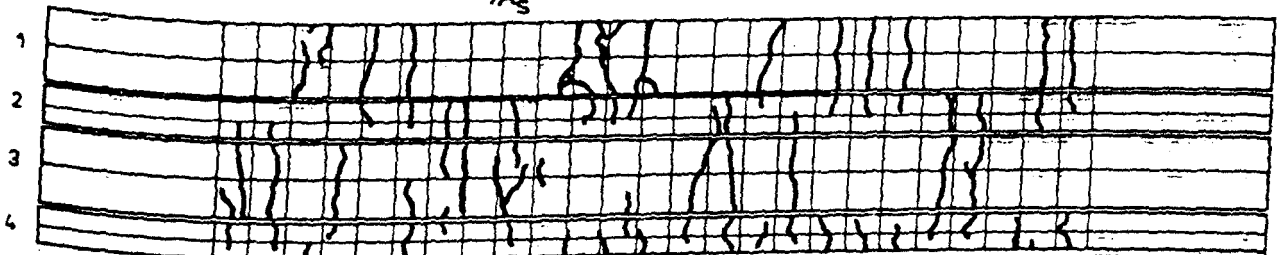
LS : 75 kN

$$(\sigma_{A_s} = 240 \text{ N/mm}^2)$$



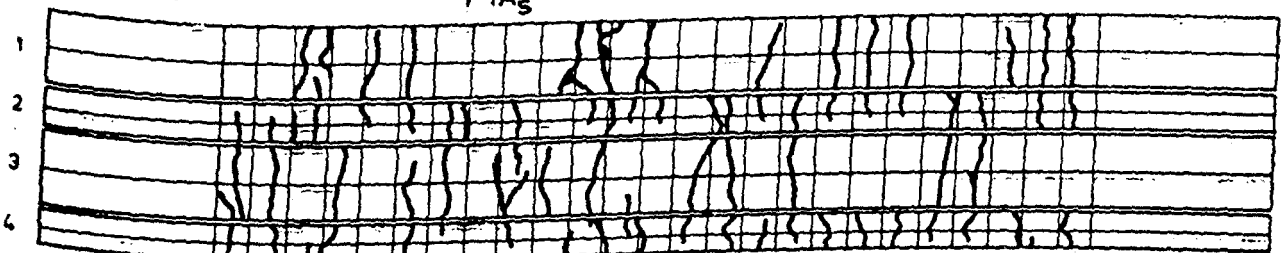
LS : 95 kN, 50 LW

$$(\sigma_{A_s} = 304 \text{ N/mm}^2)$$

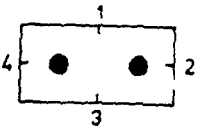


LS : 131,5 kN

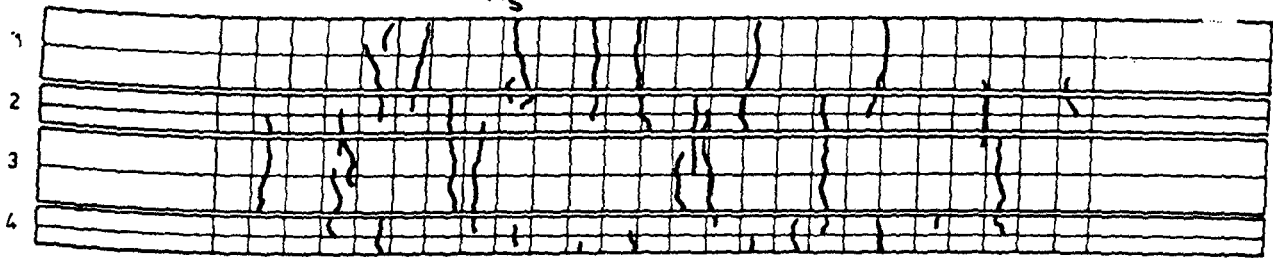
$$(\sigma_{A_s} = 420 \text{ N/mm}^2)$$



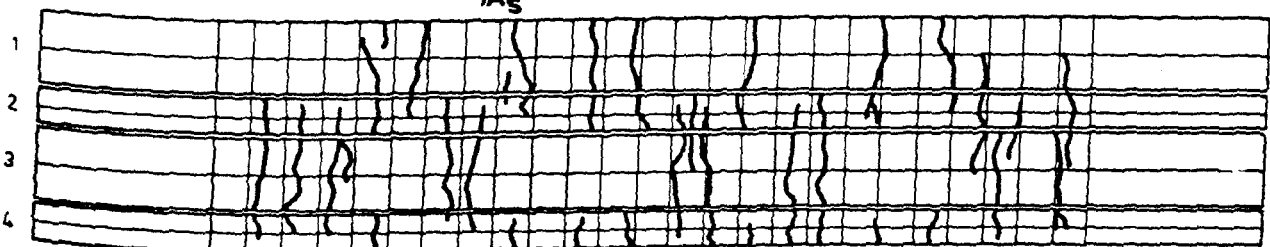
ZK 2



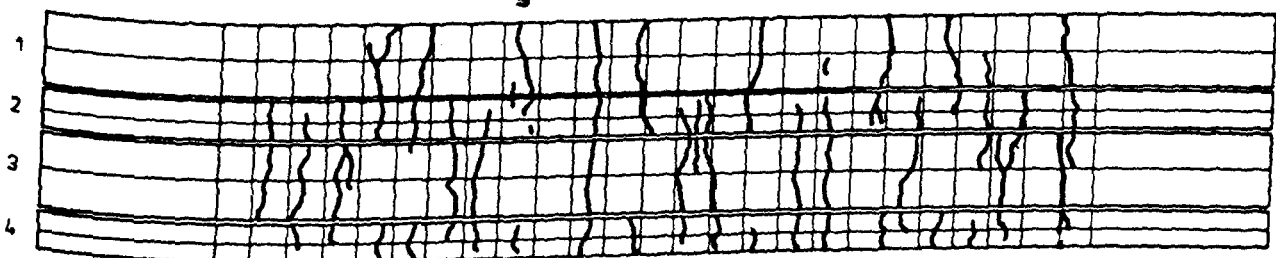
LS : 47,5 kN ( $\sigma_{A_s} = 152 \text{ N/mm}^2$ )



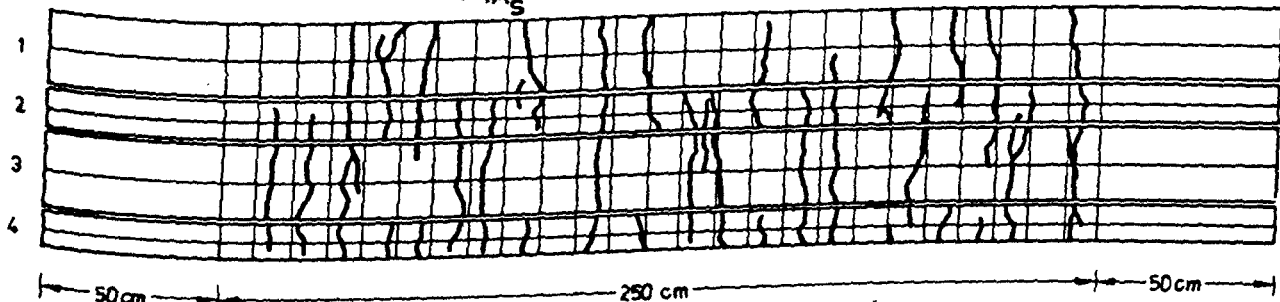
LS : 75 kN ( $\sigma_{A_s} = 240 \text{ N/mm}^2$ )



LS : 95 kN, 50 LW ( $\sigma_{A_s} = 304 \text{ N/mm}^2$ )

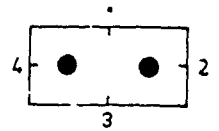


LS : 131,5 kN ( $\sigma_{A_s} = 420 \text{ N/mm}^2$ )



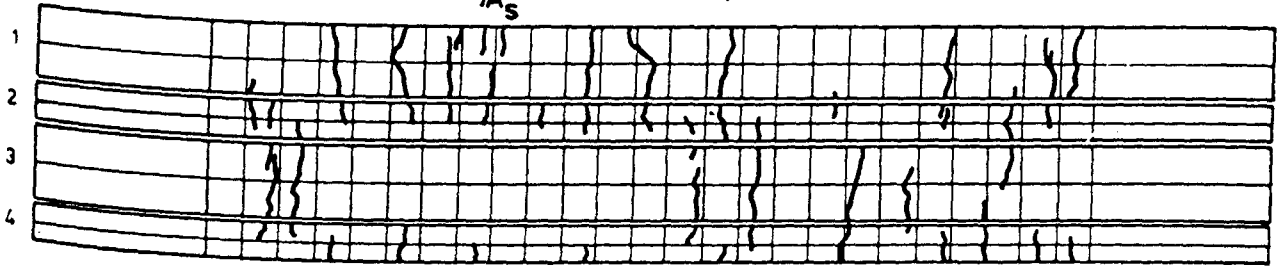
Rißentwicklung von Versuchskörper ZK 2

ZK 3



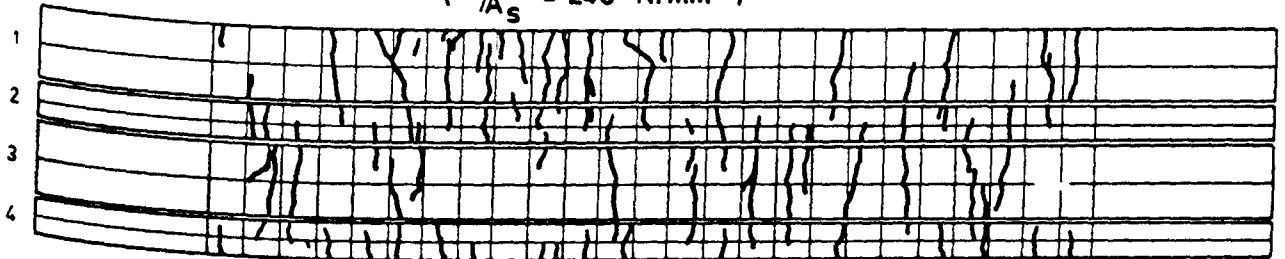
LS : 47,5 kN

$$(Z/A_s = 152 \text{ N/mm}^2)$$



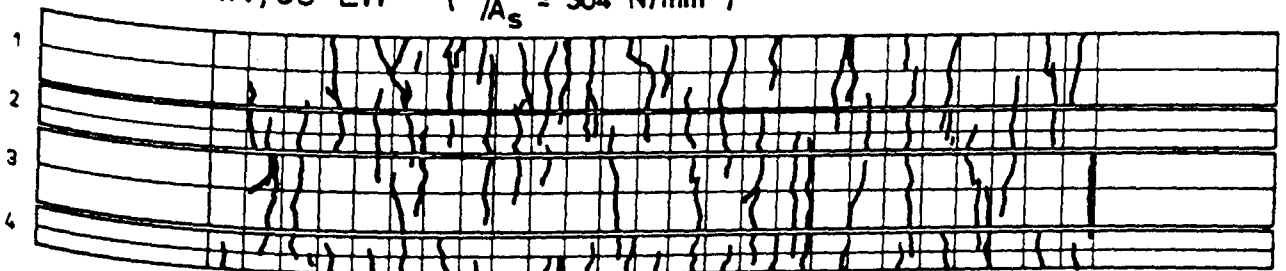
LS : 75 kN

$$(Z/A_s = 240 \text{ N/mm}^2)$$



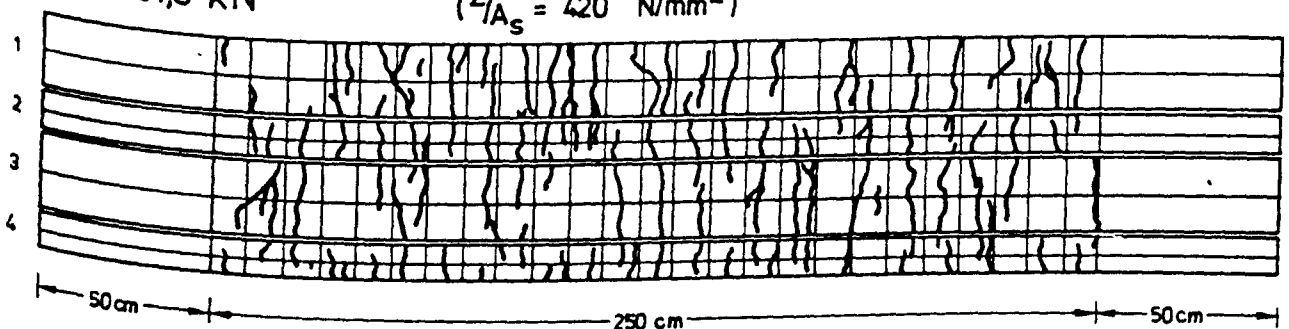
LS : 95 kN, 50 LW

$$(Z/A_s = 304 \text{ N/mm}^2)$$



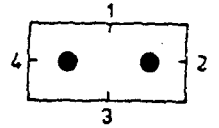
LS : 131,5 kN

$$(Z/A_s = 420 \text{ N/mm}^2)$$



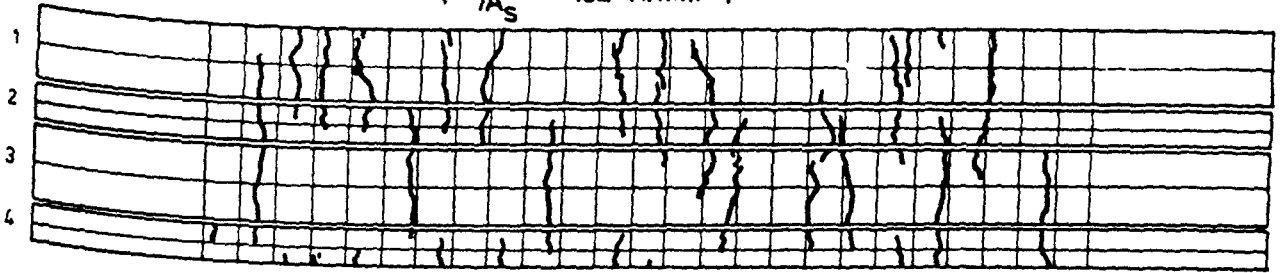
Rißentwicklung von Versuchskörper ZK 3

ZK 4



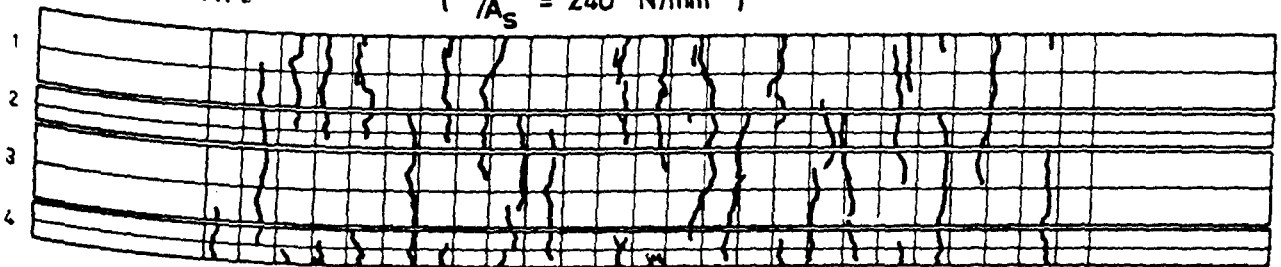
LS : 47,5 kN

$$(Z/A_s = 152 \text{ N/mm}^2)$$



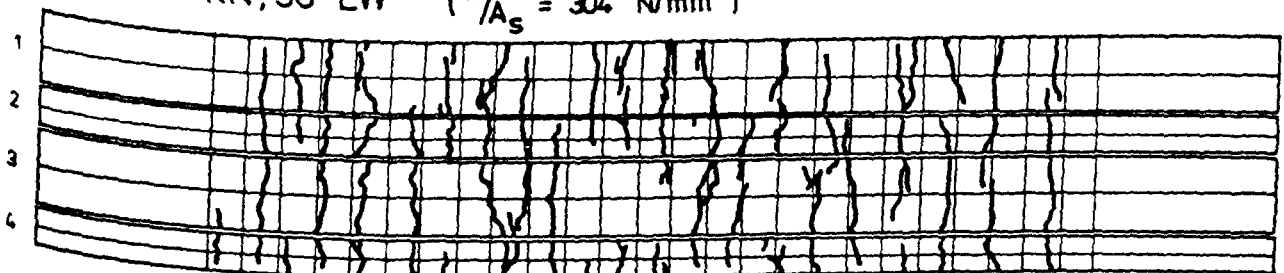
LS : 75 kN

$$(Z/A_s = 240 \text{ N/mm}^2)$$



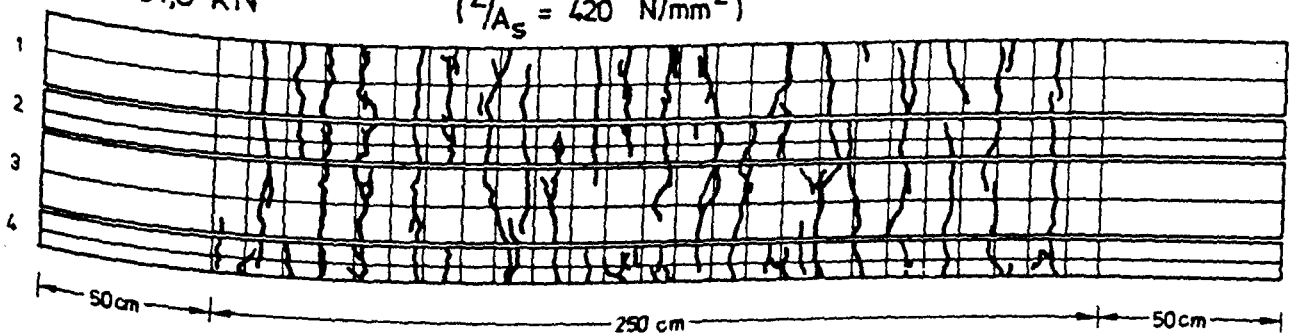
LS : 95 kN, 50 LW

$$(Z/A_s = 304 \text{ N/mm}^2)$$



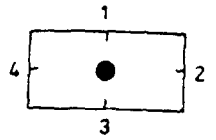
LS : 131,5 kN

$$(Z/A_s = 420 \text{ N/mm}^2)$$



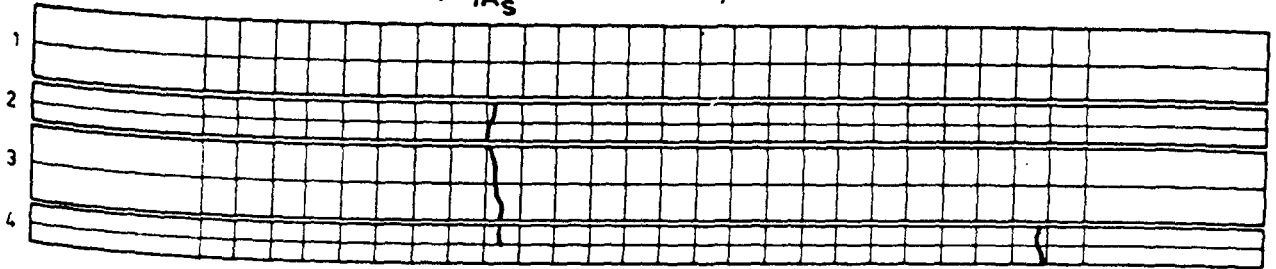
Rißentwicklung von Versuchskörper ZK 4

ZK 5



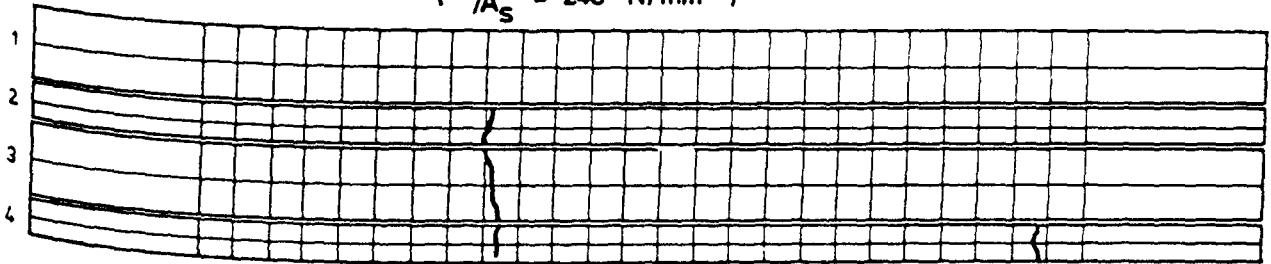
LS : 34,3 kN

$$\left( \frac{Z}{A_s} = 219 \text{ N/mm}^2 \right)$$



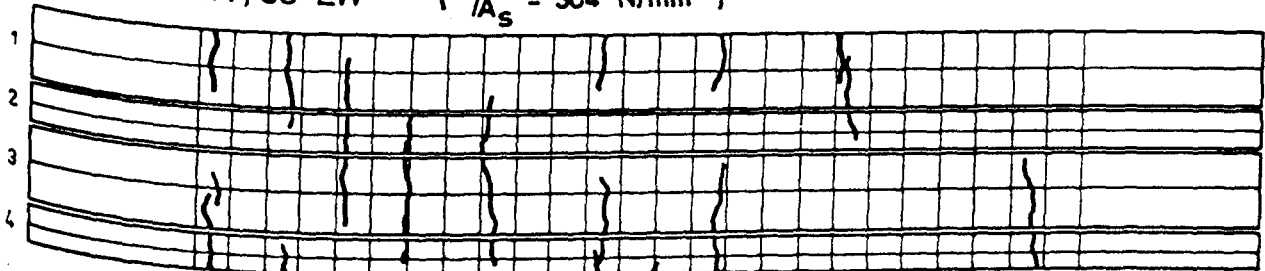
LS : 37,5 kN

$$\left( \frac{Z}{A_s} = 240 \text{ N/mm}^2 \right)$$



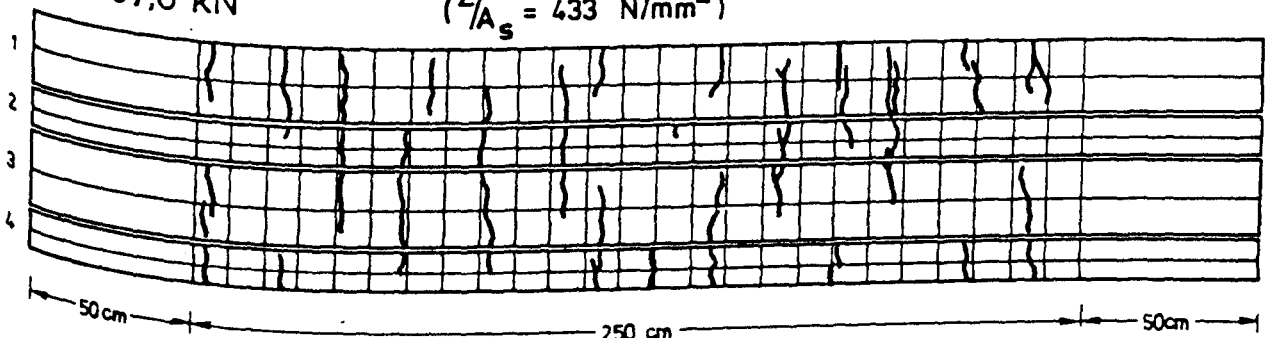
LS : 47,5 kN, 50 LW

$$\left( \frac{Z}{A_s} = 304 \text{ N/mm}^2 \right)$$



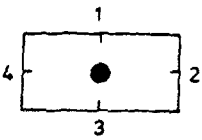
LS : 67,8 kN

$$\left( \frac{Z}{A_s} = 433 \text{ N/mm}^2 \right)$$



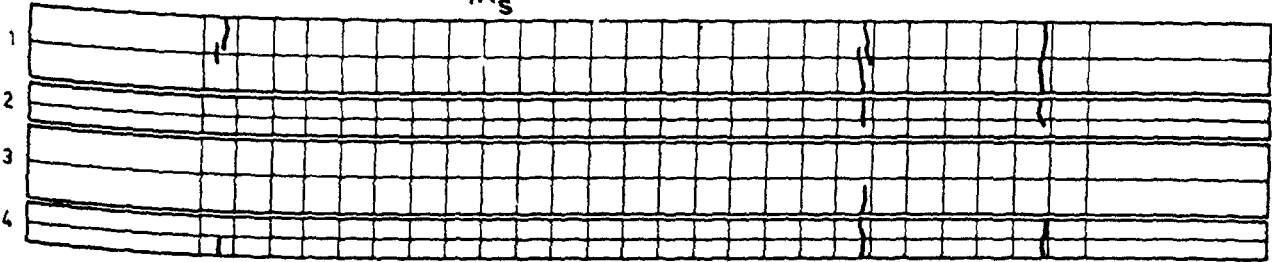
Rißentwicklung von Versuchskörper ZK 5

ZK 6



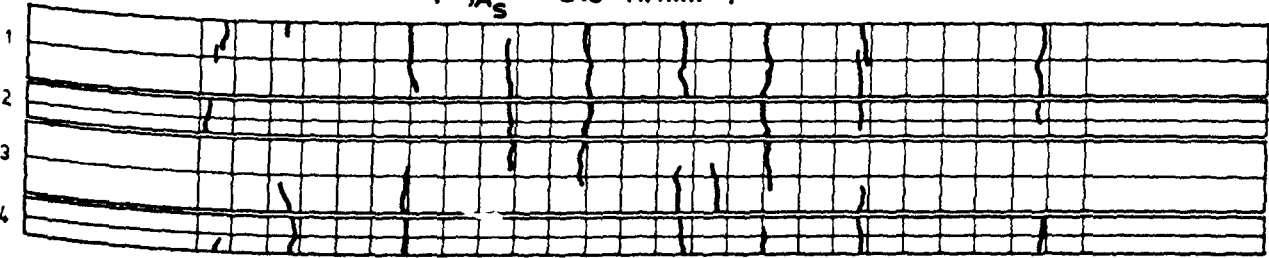
LS : 32,5 kN

$(\sigma/A_s = 208 \text{ N/mm}^2)$



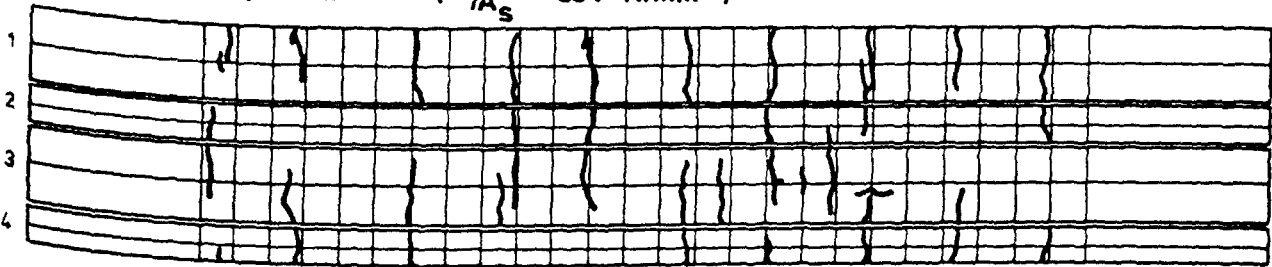
LS : 37,5 kN

$(\sigma/A_s = 240 \text{ N/mm}^2)$



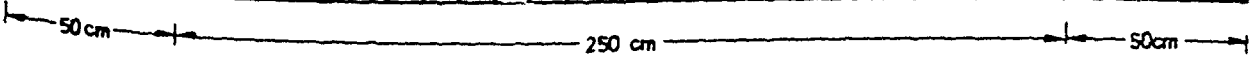
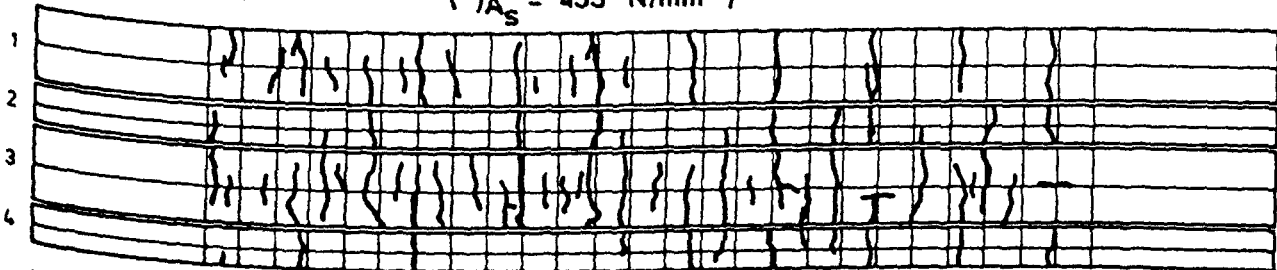
LS : 47,5 kN, 50 LW

$(\sigma/A_s = 304 \text{ N/mm}^2)$



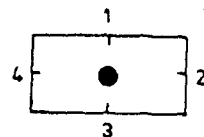
LS : 67,8 kN

$(\sigma/A_s = 433 \text{ N/mm}^2)$



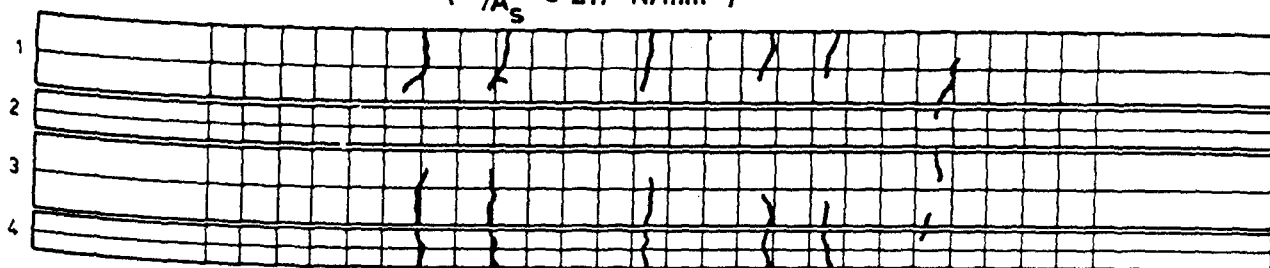
Rißentwicklung von Versuchskörper ZK 6

ZK 7



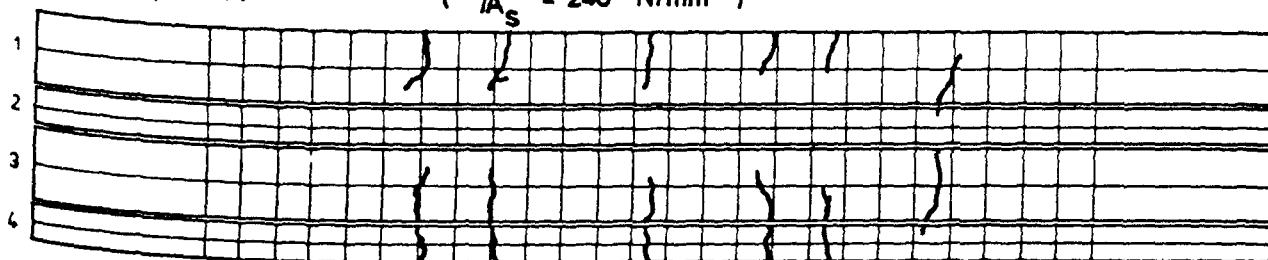
LS : 33 kN

$$(Z/A_s = 217 \text{ N/mm}^2)$$



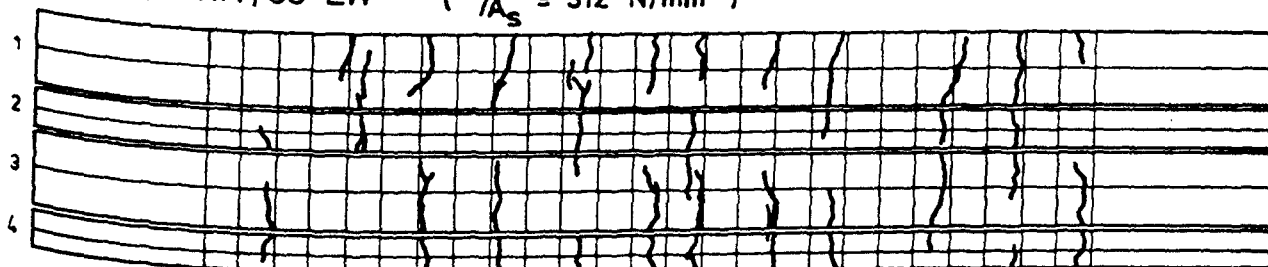
LS : 37,5 kN

$$(Z/A_s = 246 \text{ N/mm}^2)$$



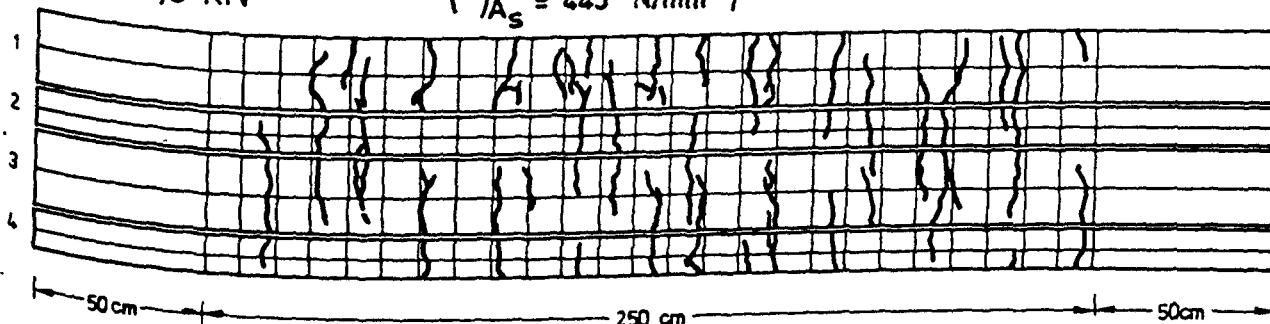
LS : 47,5 kN, 50 LW

$$(Z/A_s = 312 \text{ N/mm}^2)$$



LS : 67,8 kN

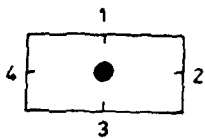
$$(Z/A_s = 445 \text{ N/mm}^2)$$



Rißentwicklung von Versuchskörper ZK 7

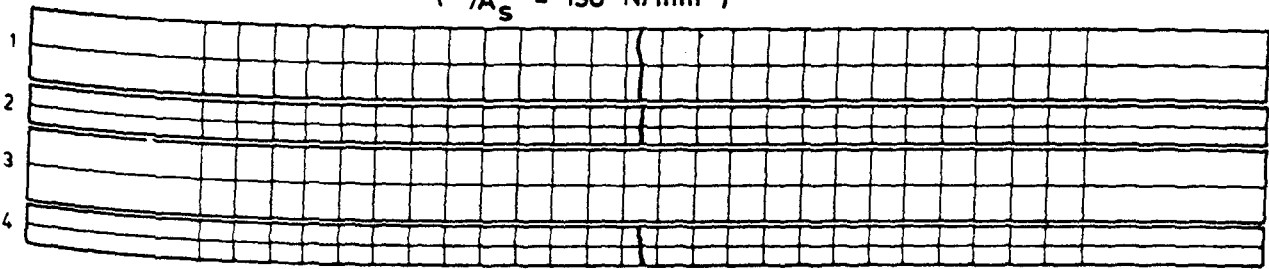


ZK 8



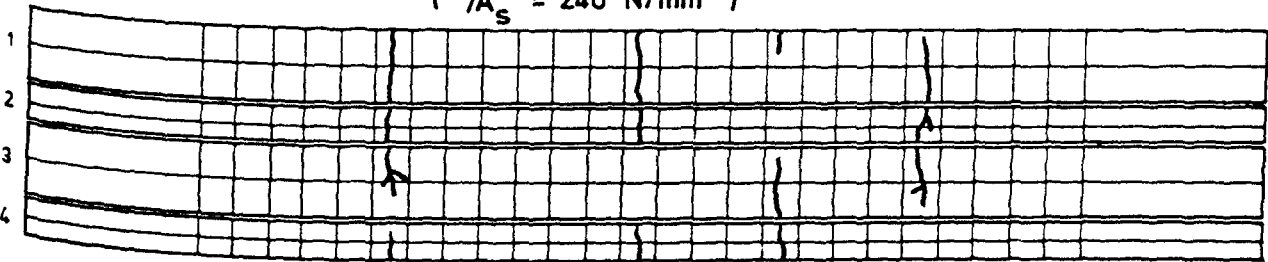
LS : 29 kN

$(\sigma/A_s = 190 \text{ N/mm}^2)$



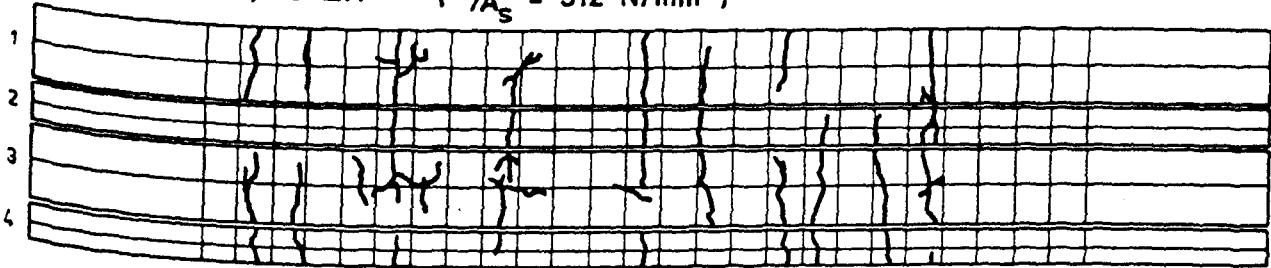
LS : 37,5 kN

$(\sigma/A_s = 246 \text{ N/mm}^2)$



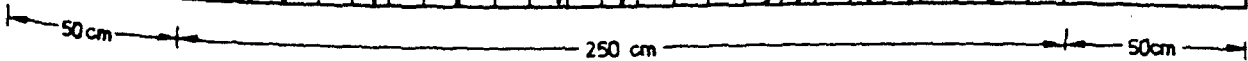
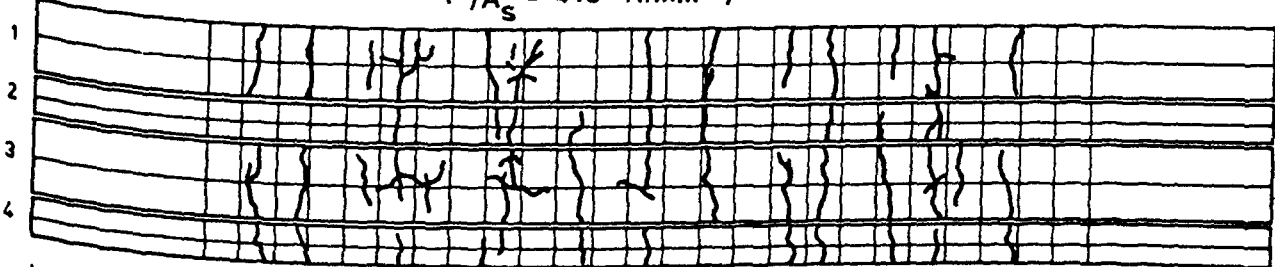
LS : 47,5 kN, 50 LW

$(\sigma/A_s = 312 \text{ N/mm}^2)$



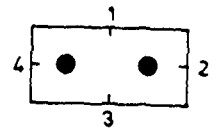
LS : 67,8 kN

$(\sigma/A_s = 445 \text{ N/mm}^2)$



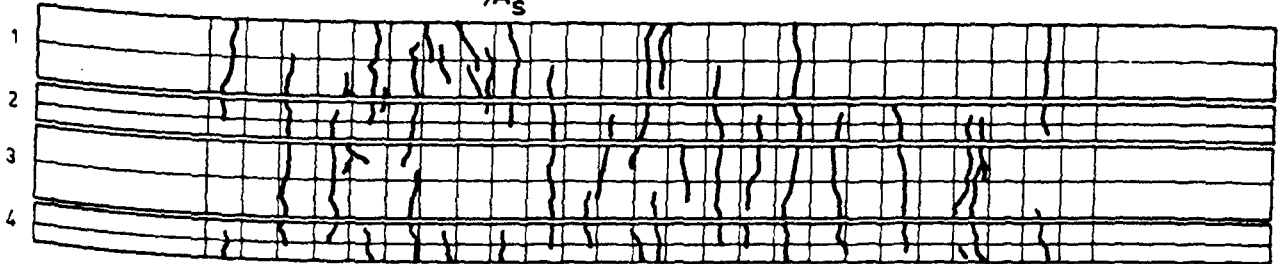
Rißentwicklung von Versuchskörper ZK 8

ZK 9



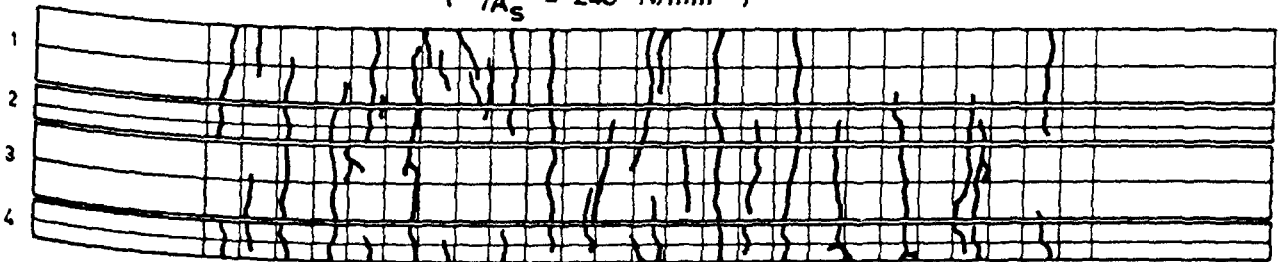
LS : 47,5 kN

$$(\sigma/A_s = 152 \text{ N/mm}^2)$$



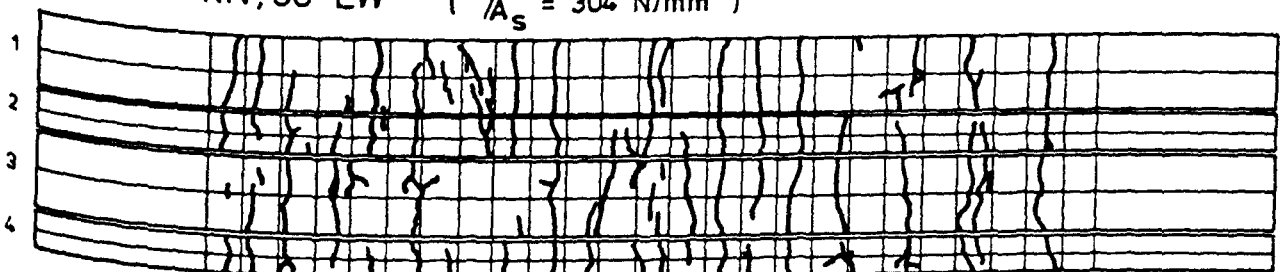
LS : 75 kN

$$(\sigma/A_s = 240 \text{ N/mm}^2)$$



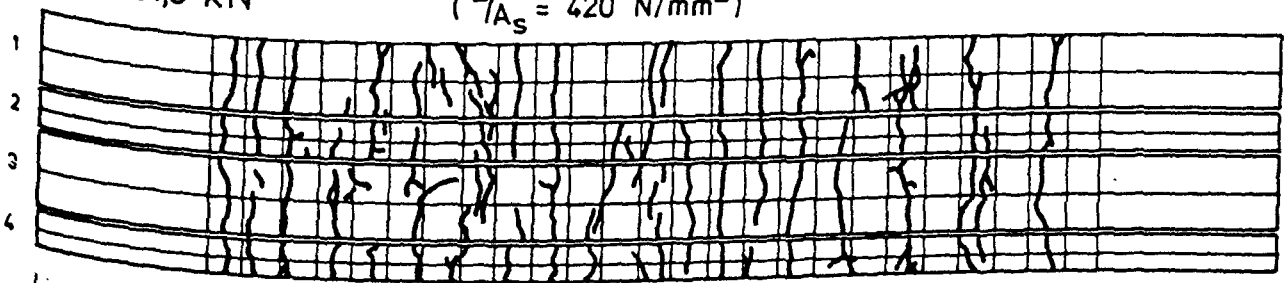
LS : 95 kN, 50 LW

$$(\sigma/A_s = 304 \text{ N/mm}^2)$$



LS : 131,5 kN

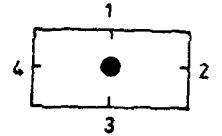
$$(\sigma/A_s = 420 \text{ N/mm}^2)$$



50 cm      250 cm      50 cm

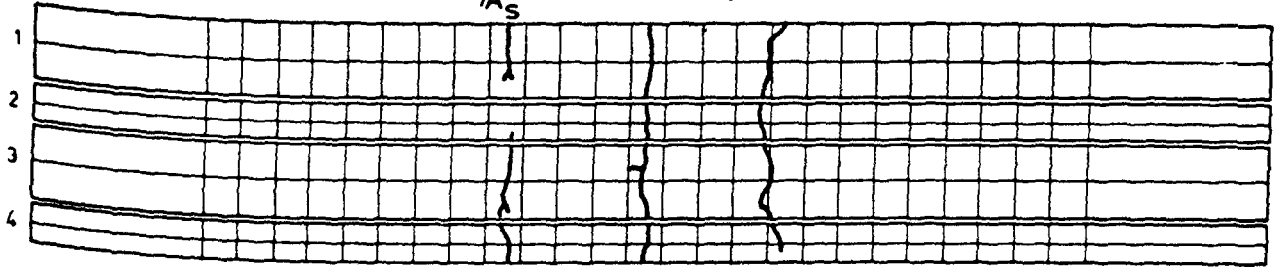
Rißentwicklung von Versuchskörper ZK 9

ZK 10



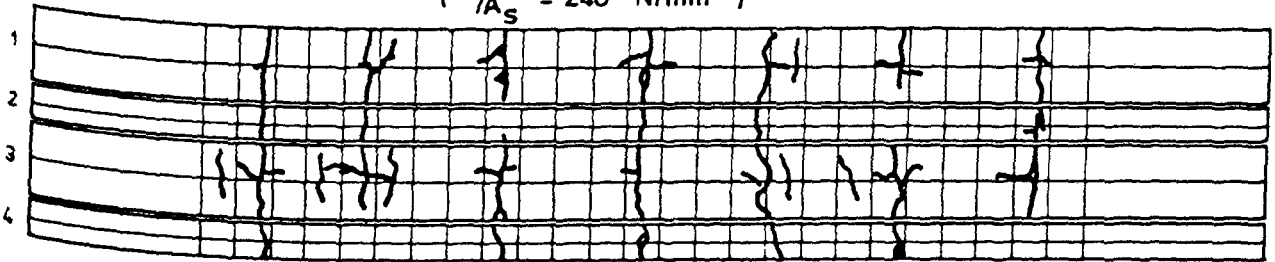
LS : 26,5 kN

$$(Z/A_s = 169 \text{ N/mm}^2)$$



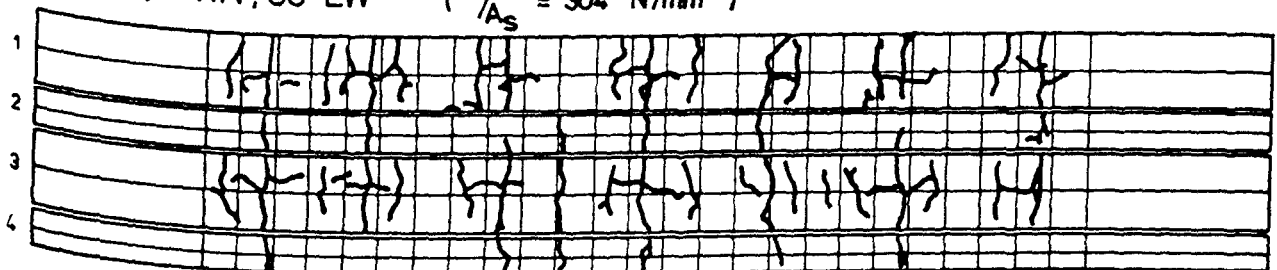
LS : 37,5 kN

$$(Z/A_s = 240 \text{ N/mm}^2)$$



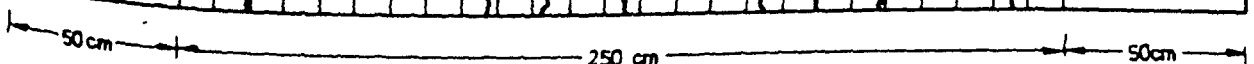
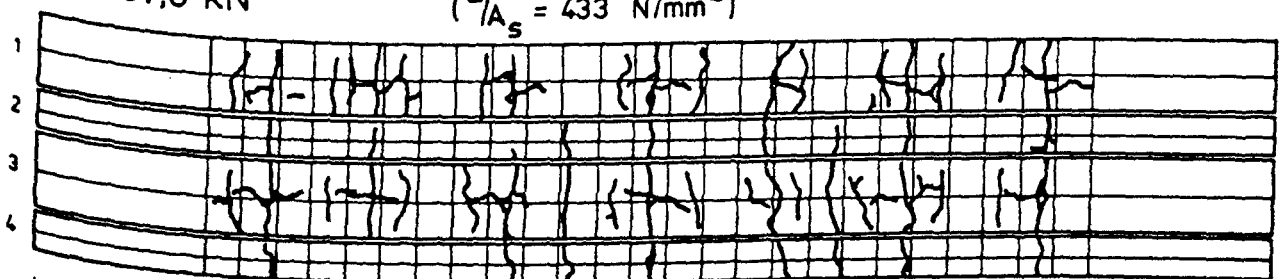
LS : 47,5 kN, 50 LW

$$(Z/A_s = 304 \text{ N/mm}^2)$$

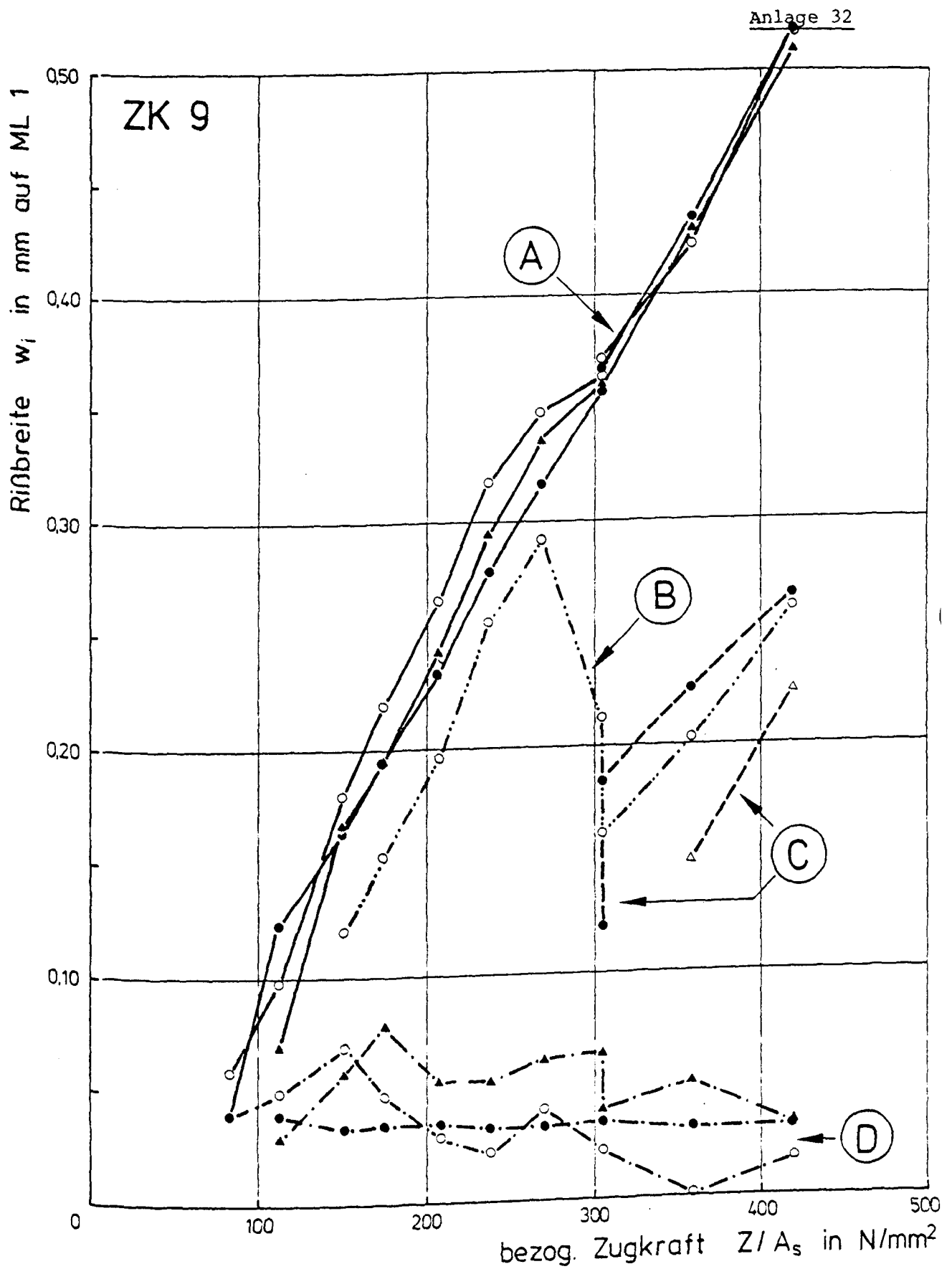


LS : 67,8 kN

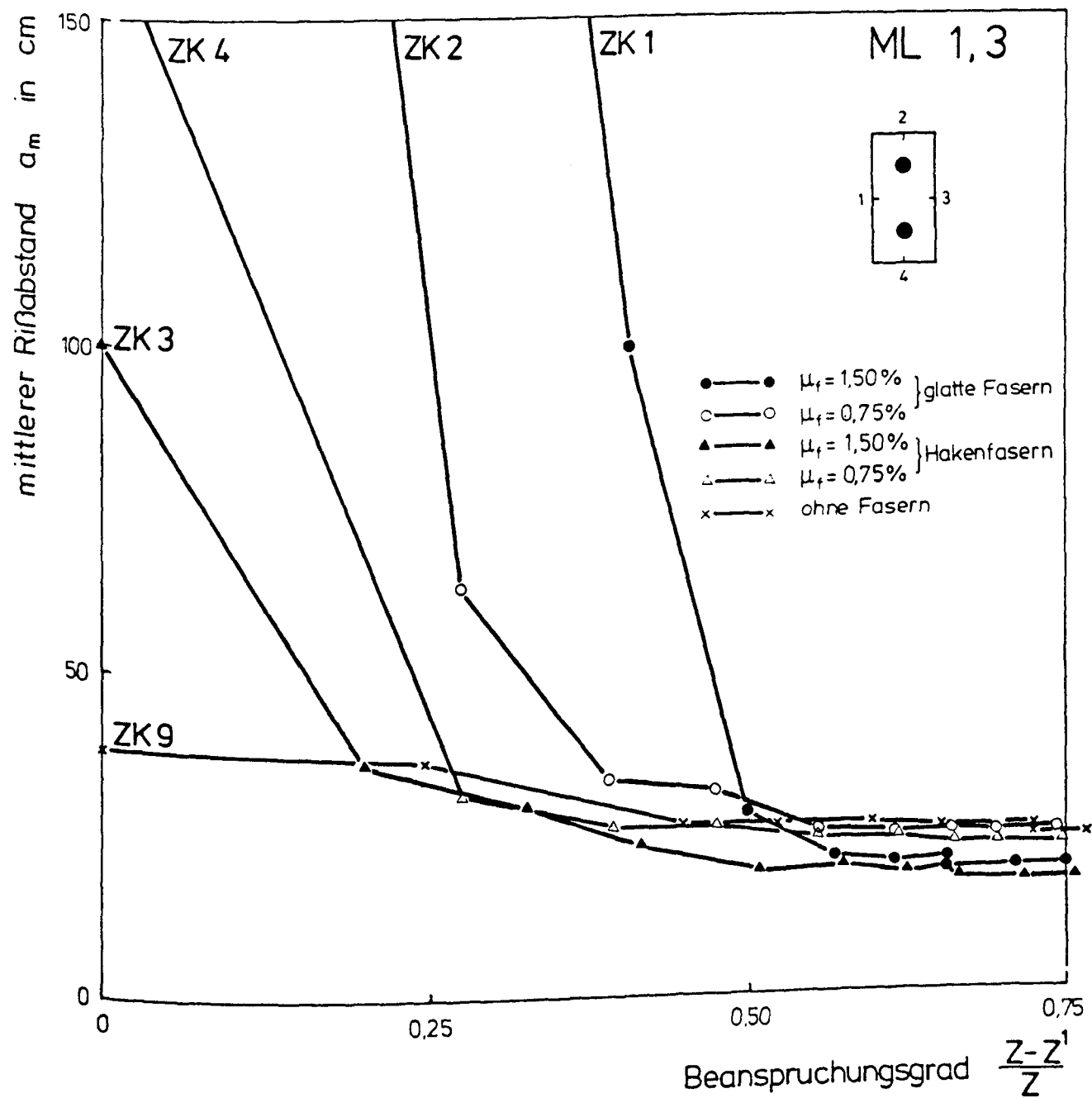
$$(Z/A_s = 433 \text{ N/mm}^2)$$



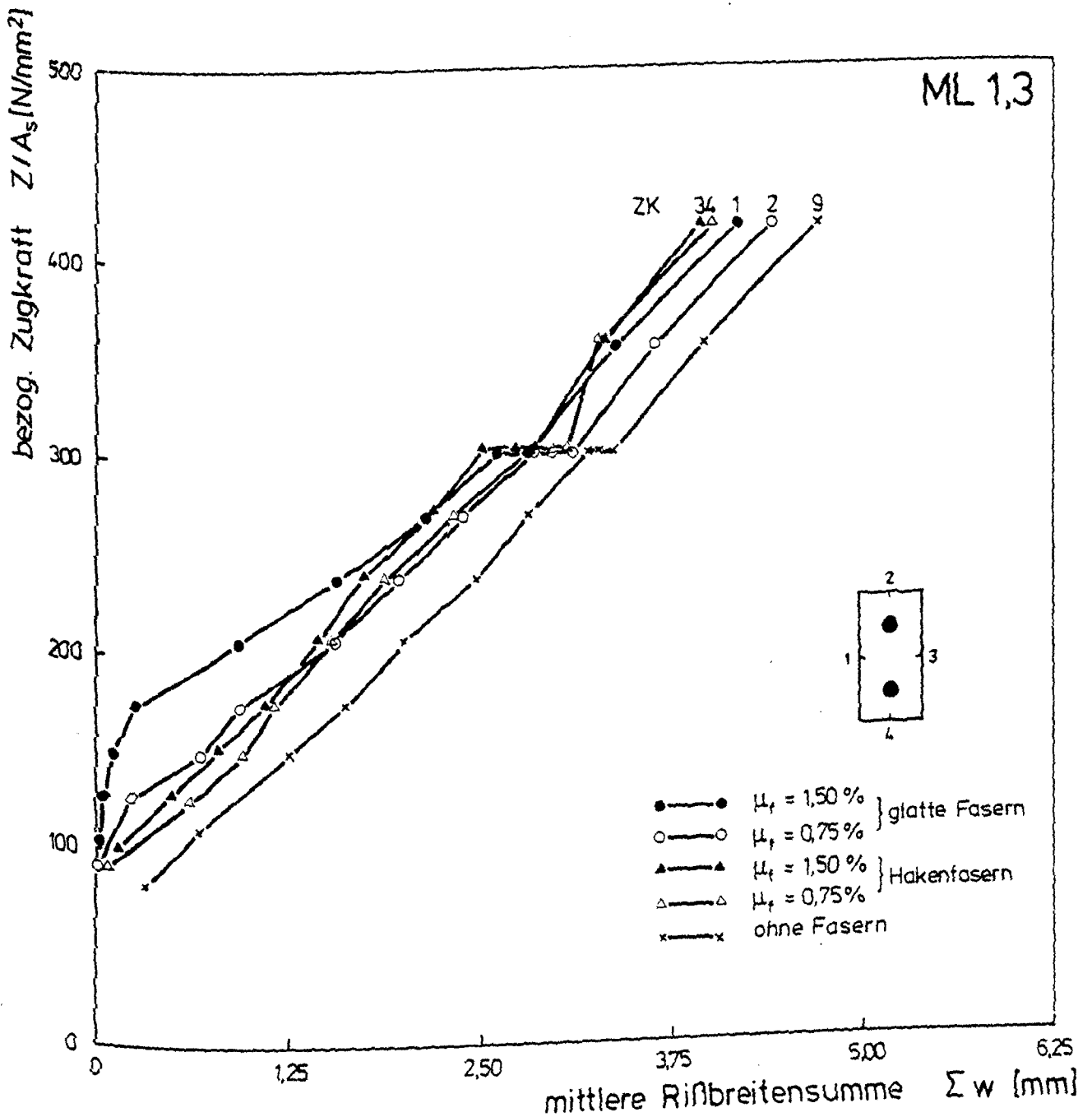
Rißentwicklung von Versuchskörper ZK 10



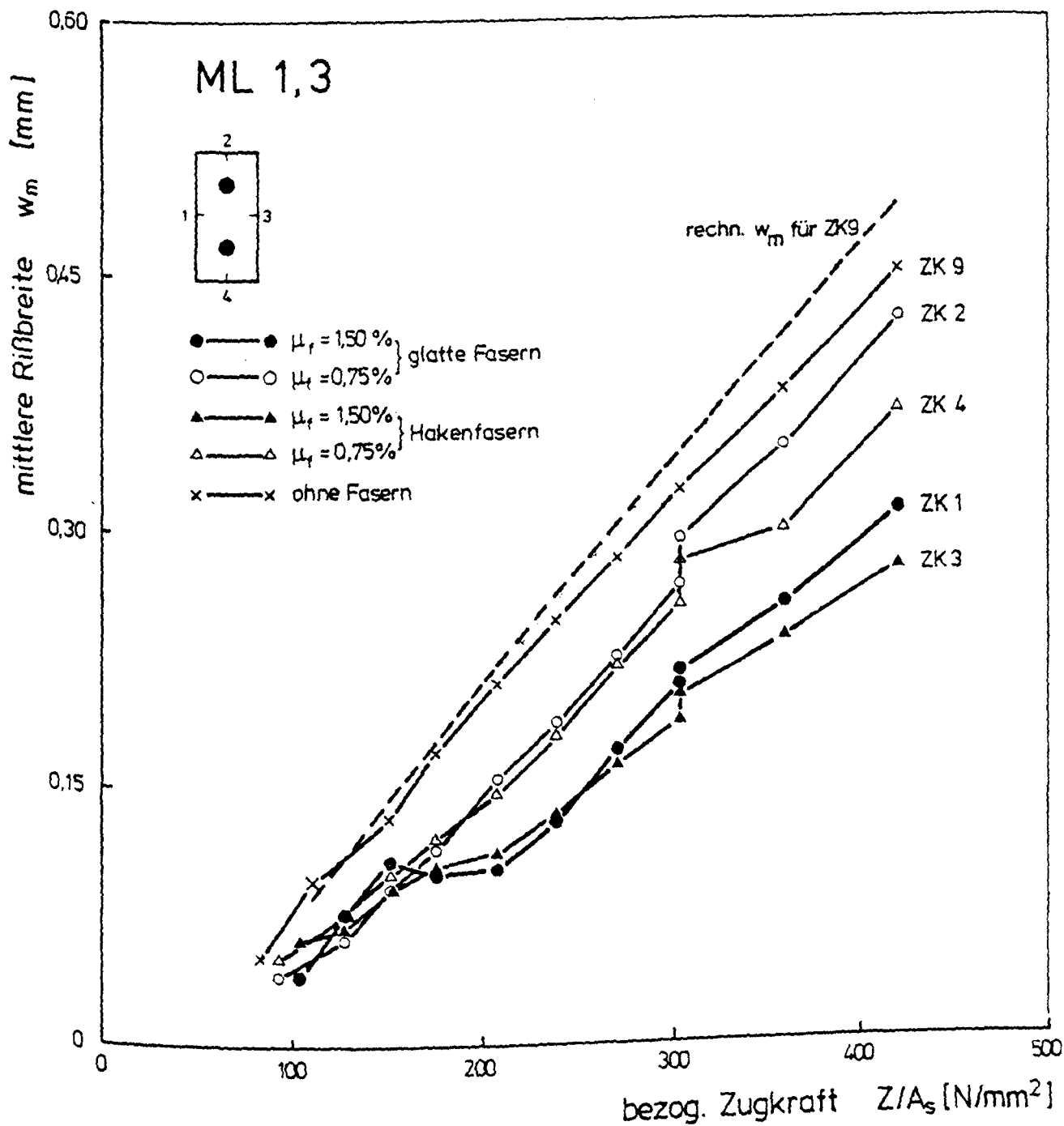
Rißbreitenentwicklung einzelner Risse in Abhängigkeit von der Belastung -  
ZK 9, Meßlinie 1



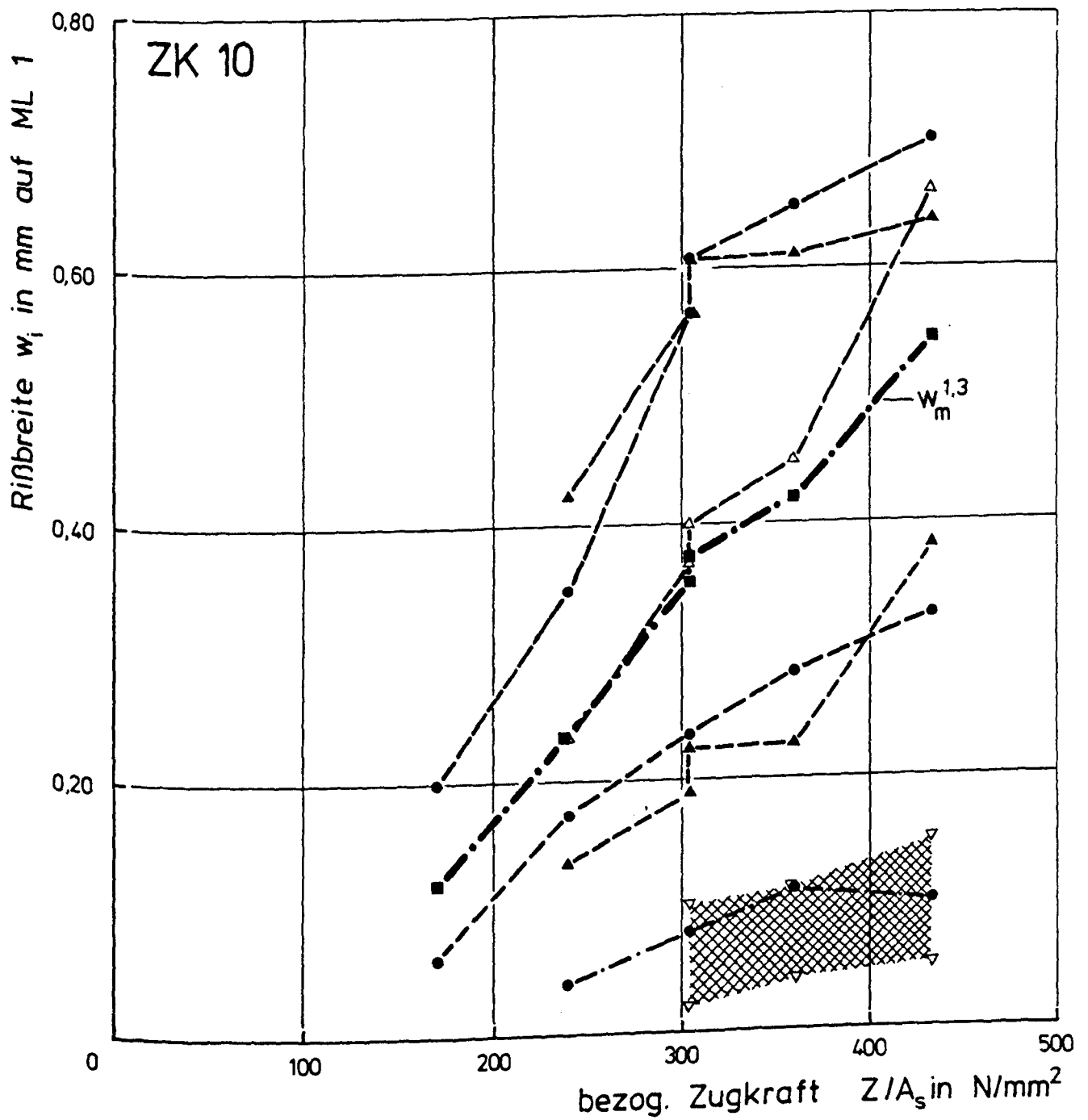
Mittlerer Rißabstand  $a_m$  in Abhängigkeit vom Beanspruchungsgrad -  
Versuchskörper mit zwei Bewehrungsstäben, Meßlinien 1 und 3



Mittlere Rißbreitensumme in Abhängigkeit von der Belastung -  
 Versuchskörper mit zwei Bewehrungsstäben, Meßlinien 1 und 3

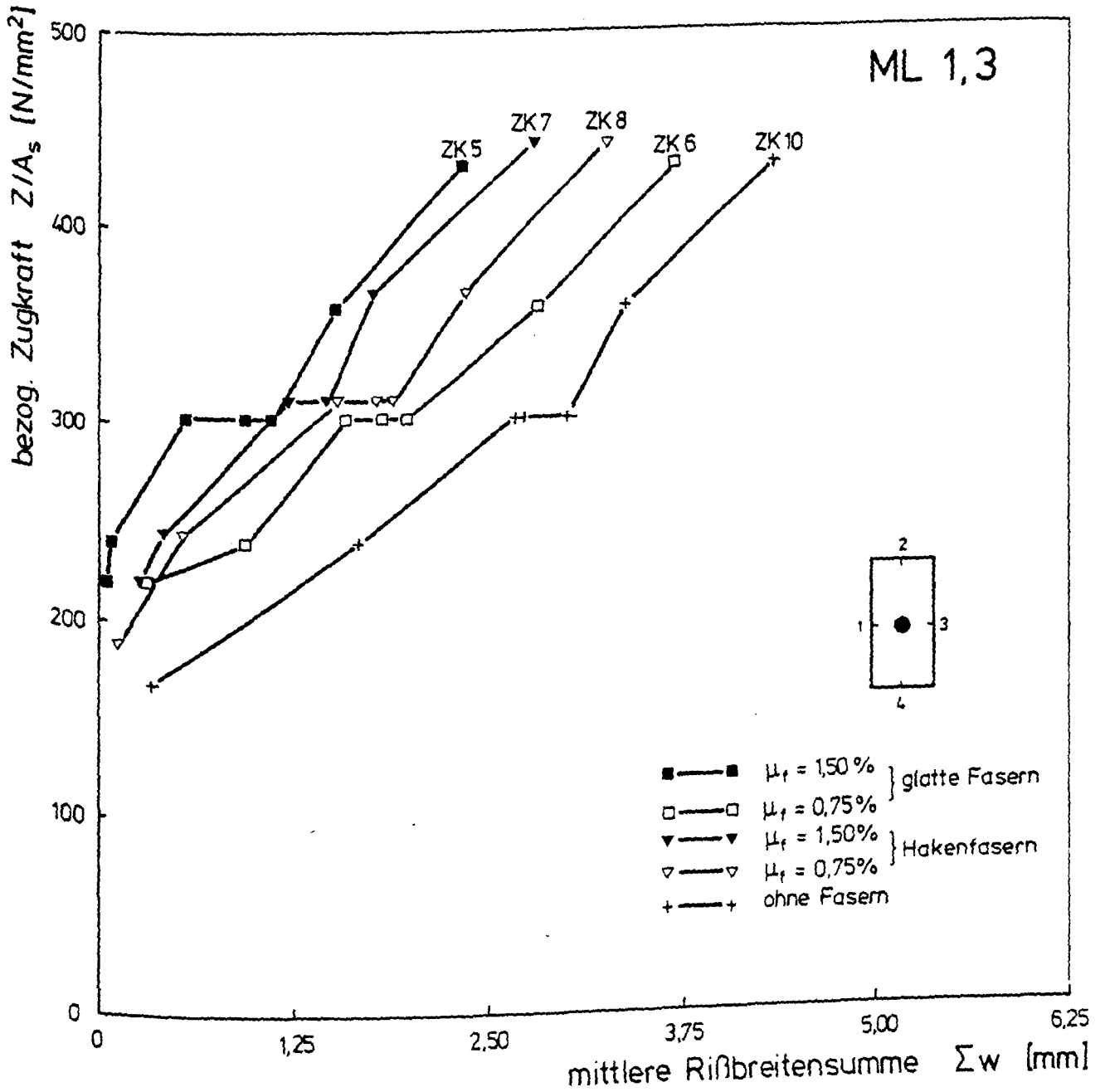


Mittlere Rißbreite  $w_m$  in Abhängigkeit von der Belastung -  
Versuchskörper mit zwei Bewehrungsstäben, Meßlinien 1 und 3, sowie  
rechnerische Rißbreite  $w_m$  für ZK 9 nach CEB

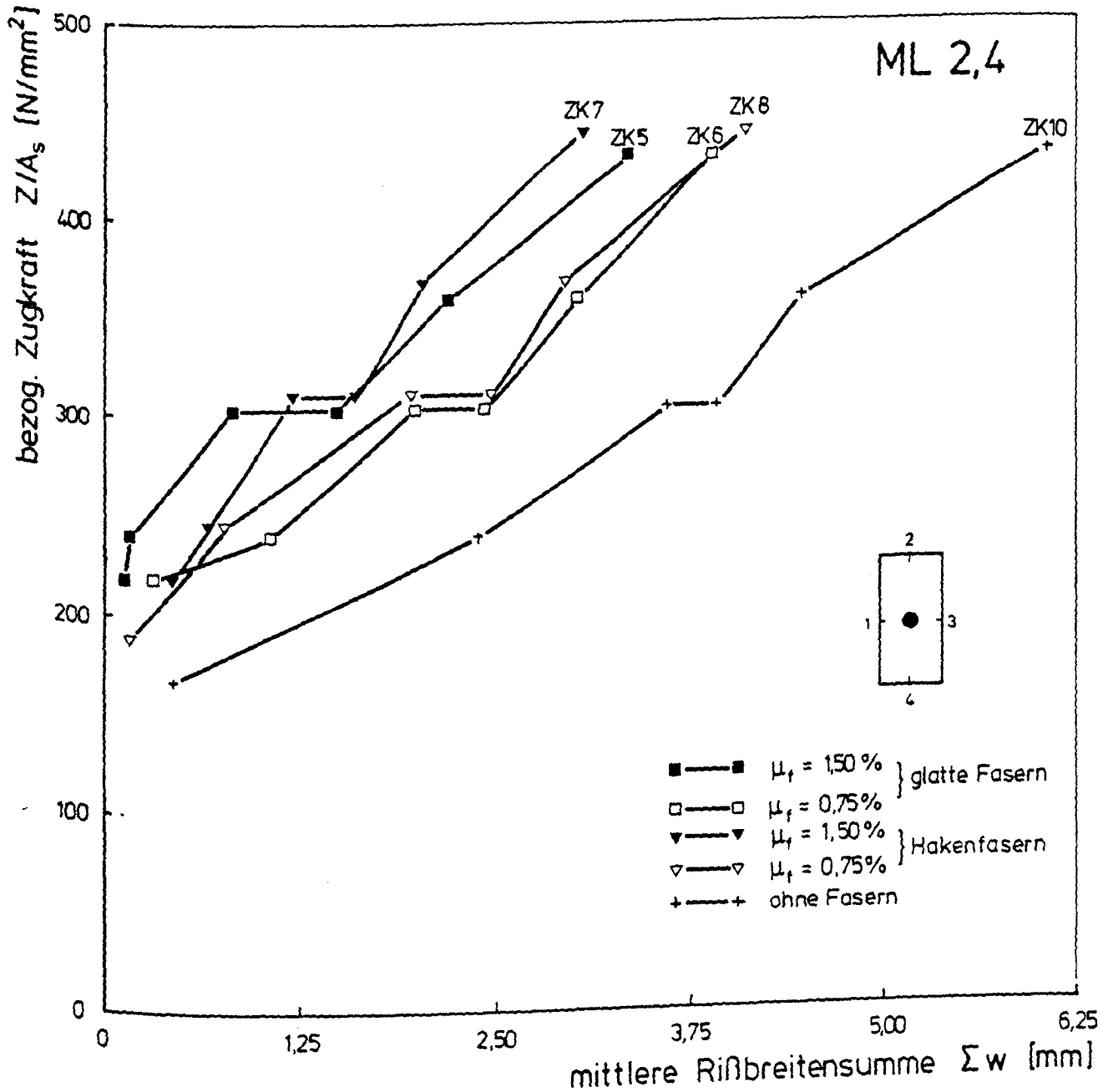


Rißbreitenentwicklung einzelner Risse in Abhängigkeit von der Belastung  
ZK 10, Meßlinie 1

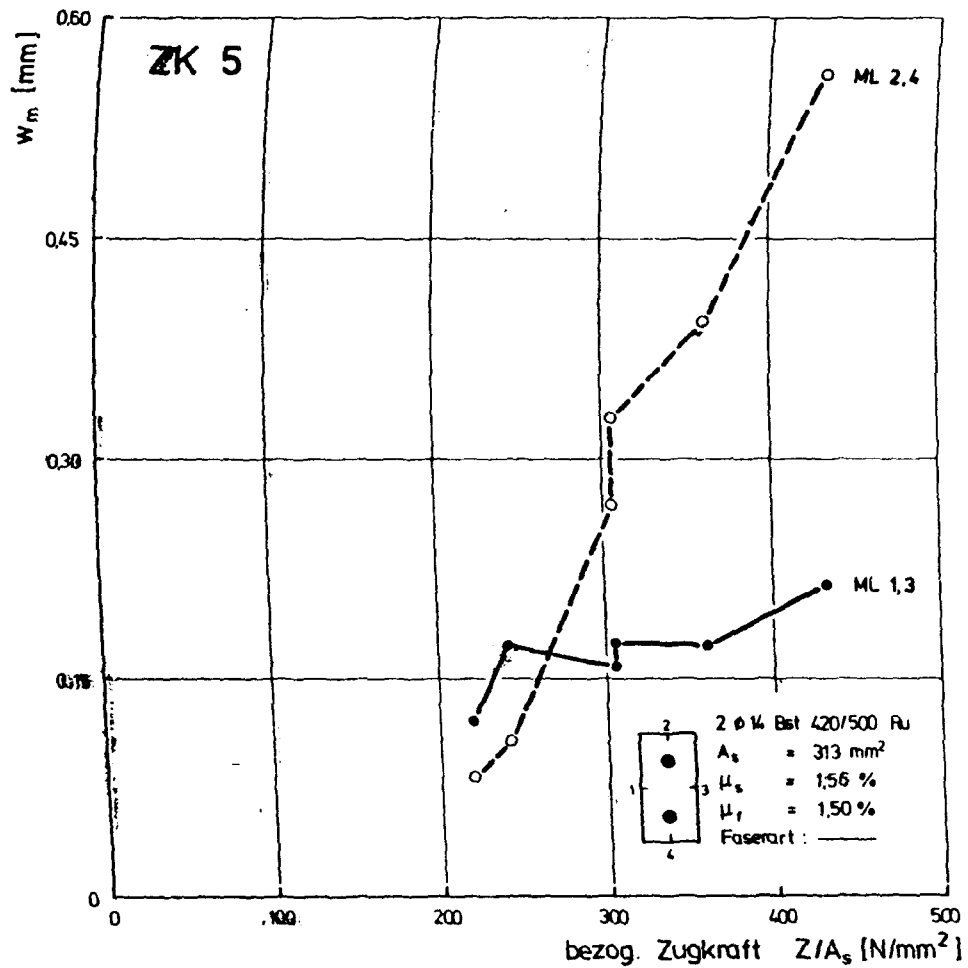




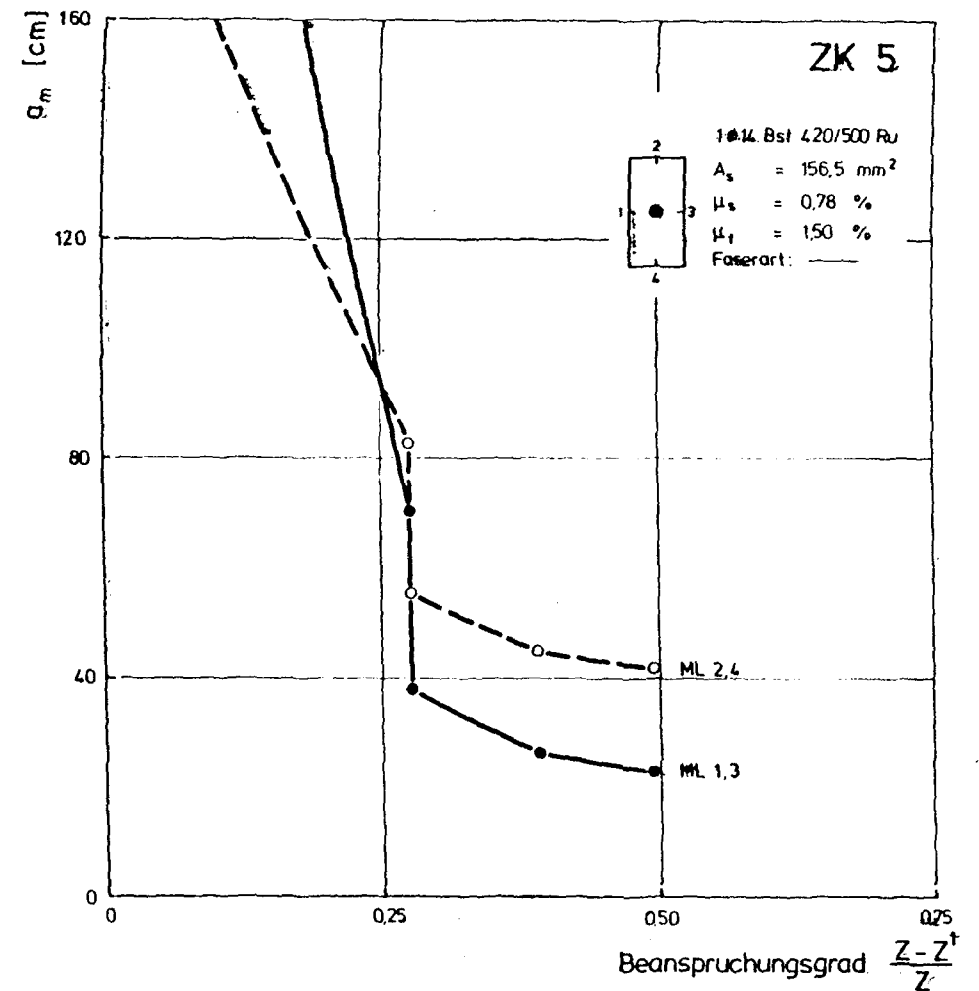
Mittlere Rißbreitensumme in Abhängigkeit von der Belastung -  
Versuchskörper mit einem Betonstab, Meßlinien 1 und 3



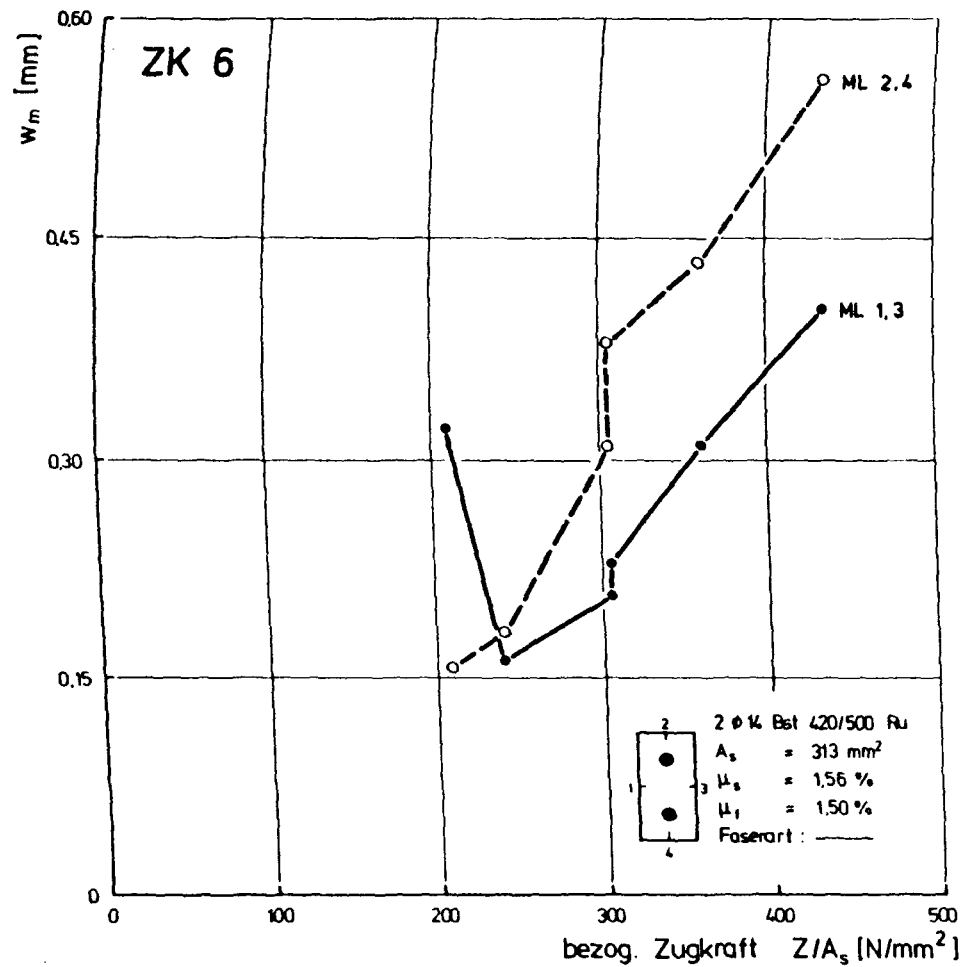
Mittlere Rißbreitensummen in Abhängigkeit von der Belastung -  
 Versuchskörper mit einem Betonstab, Meßlinien 2 und 4



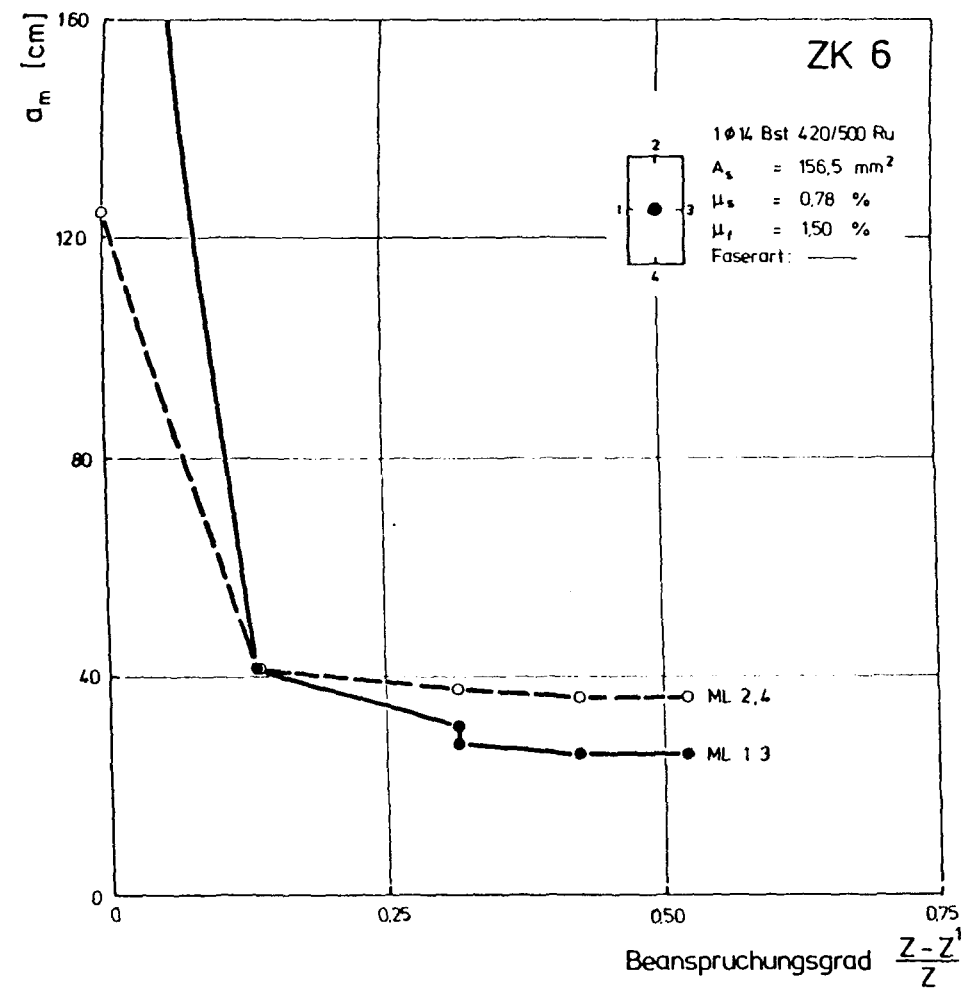
Mittlere Rißbreite  $w_m$  in Abhängigkeit von der Belastung für ZK 5



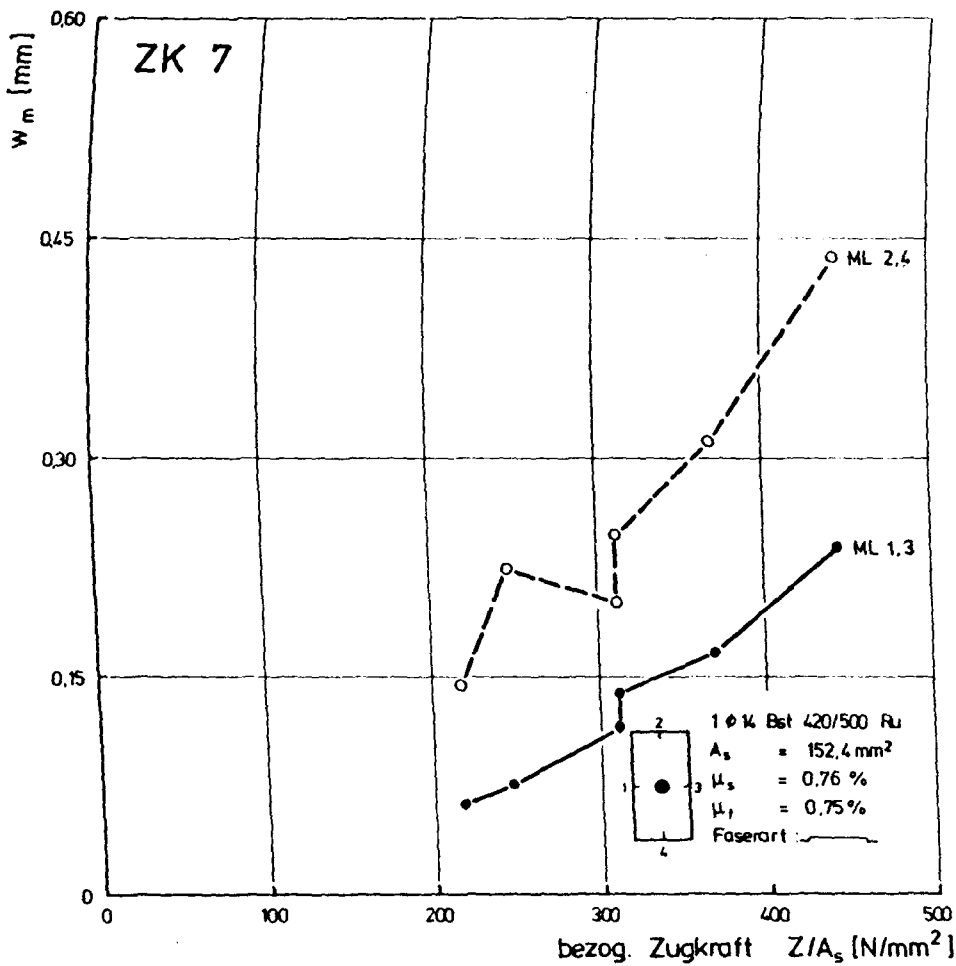
Mittlerer Rißabstand  $a_m$  in Abhängigkeit vom Beanspruchungsgrad für ZK 5



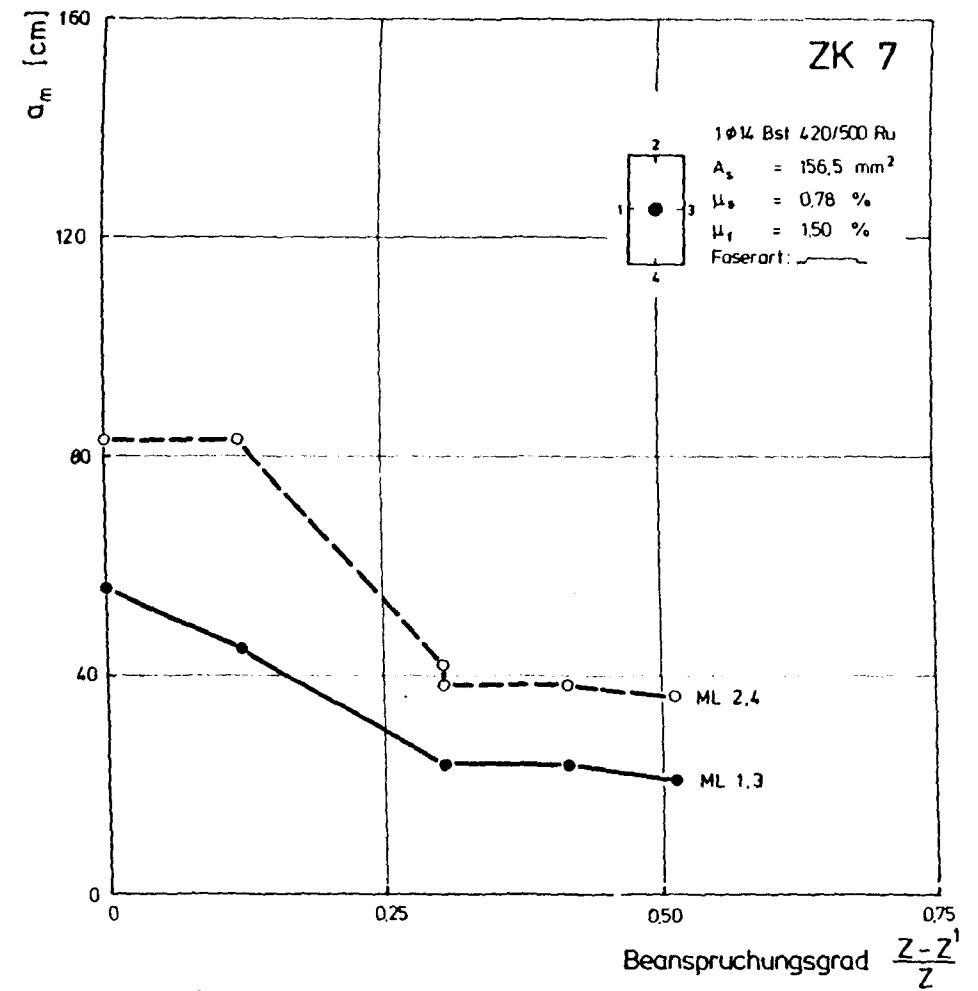
Mittlere Rißbreite  $w_m$  in Abhängigkeit von der Belastung für ZK 6



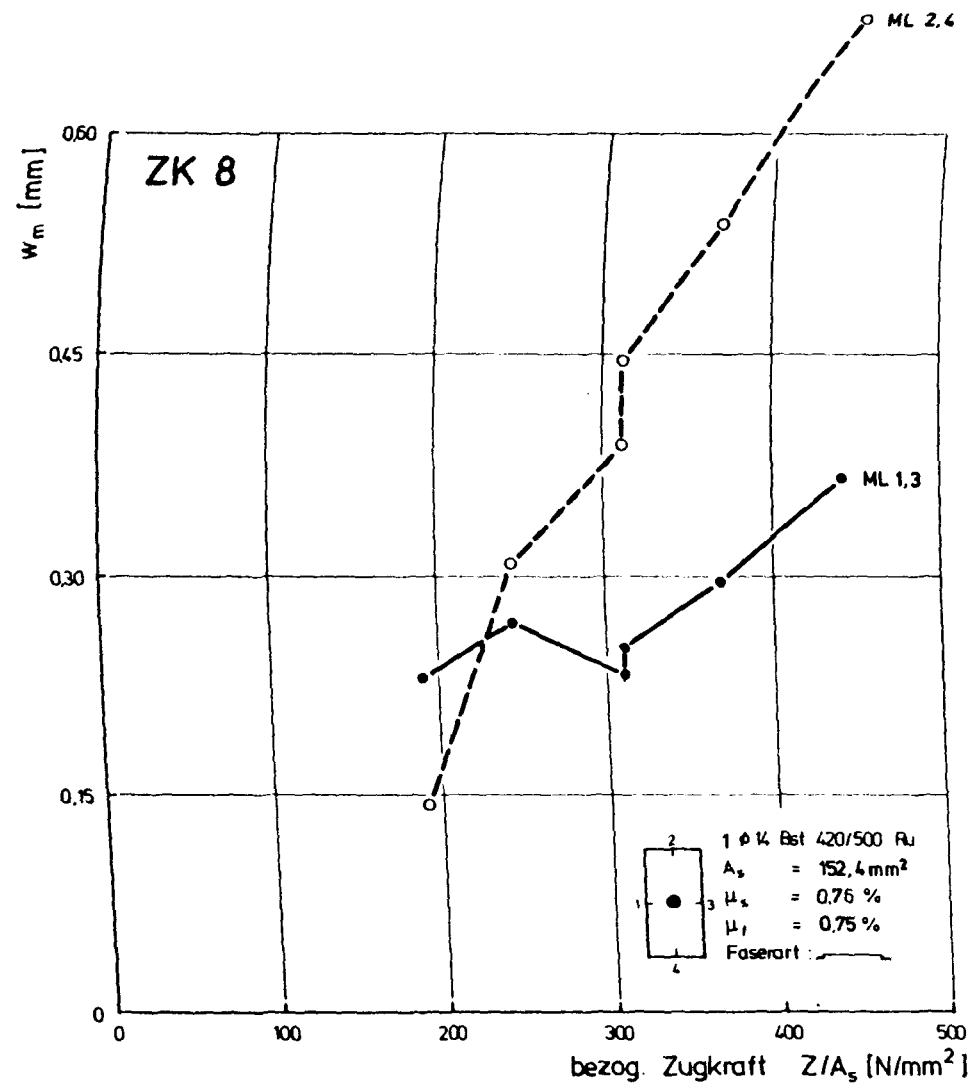
Mittlerer Rißabstand  $a_m$  in Abhängigkeit vom Beanspruchungsgrad für ZK 6



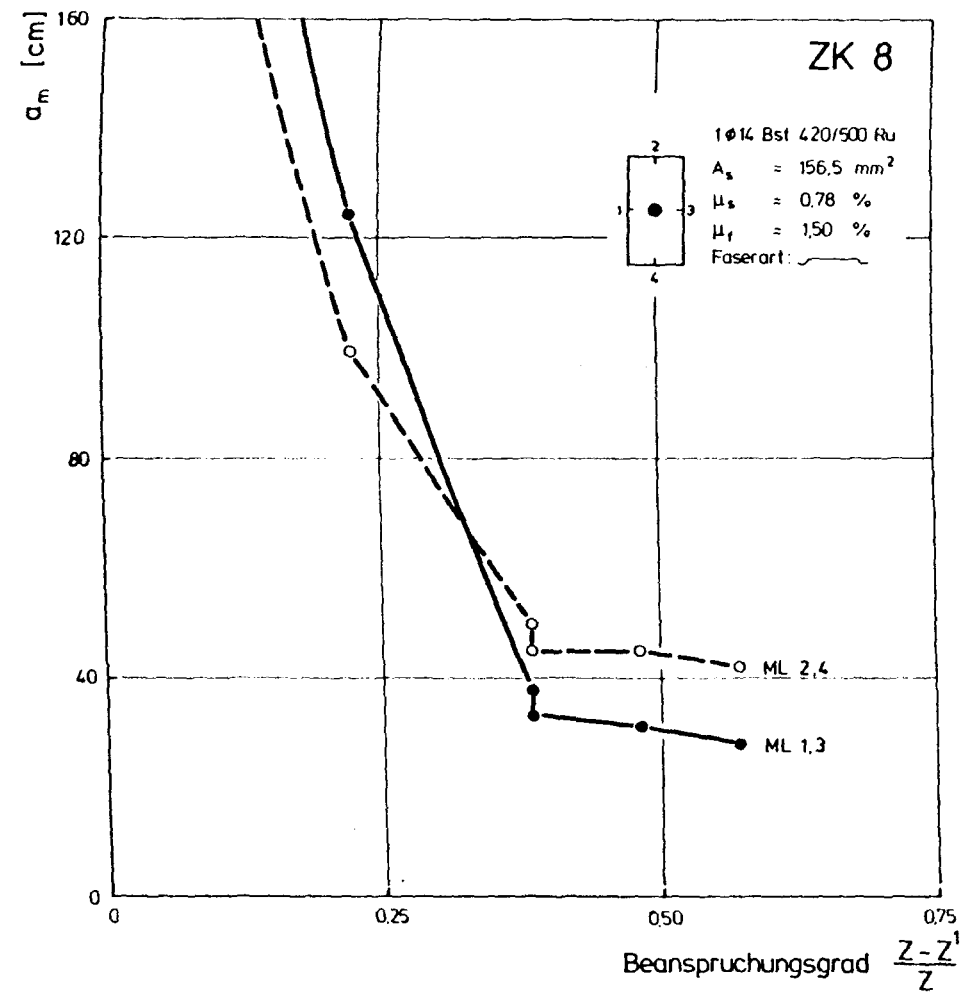
Mittlere Rißbreite  $w_m$  in Abhängigkeit von der Belastung für ZK 7



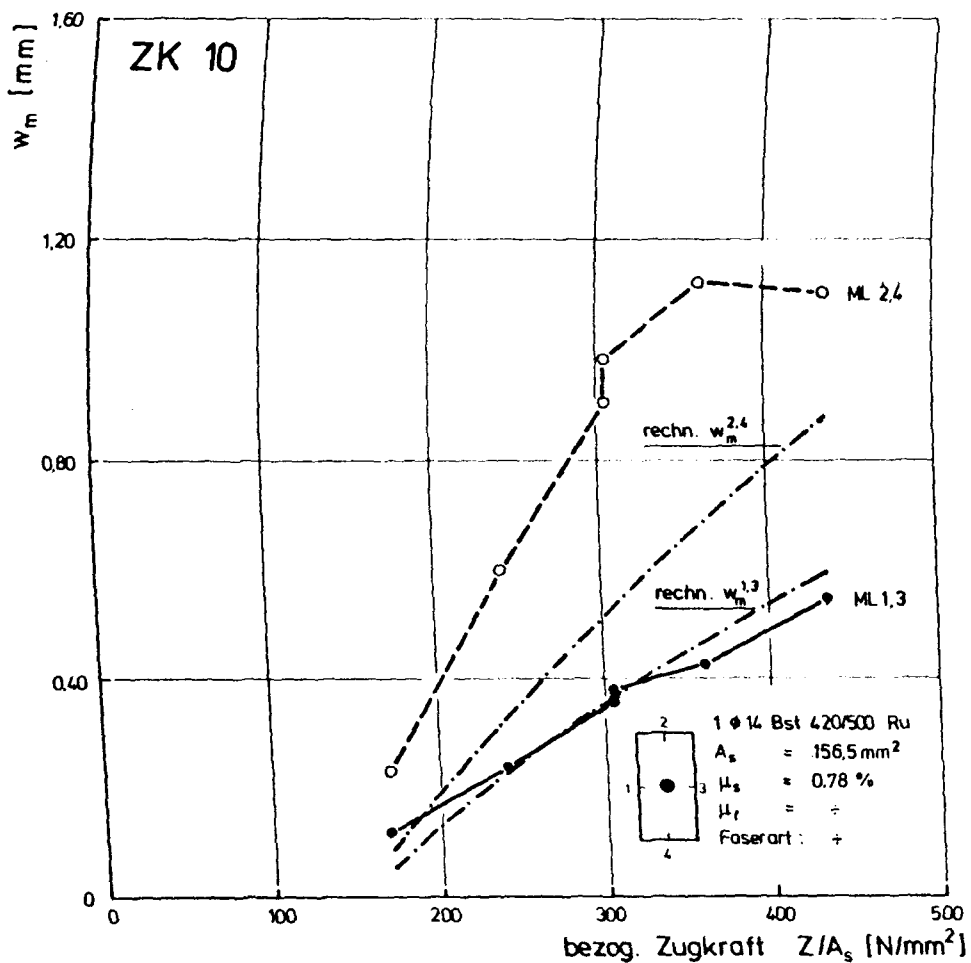
Mittlerer Rißabstand  $a_m$  in Abhängigkeit vom Beanspruchungsgrad für ZK 7



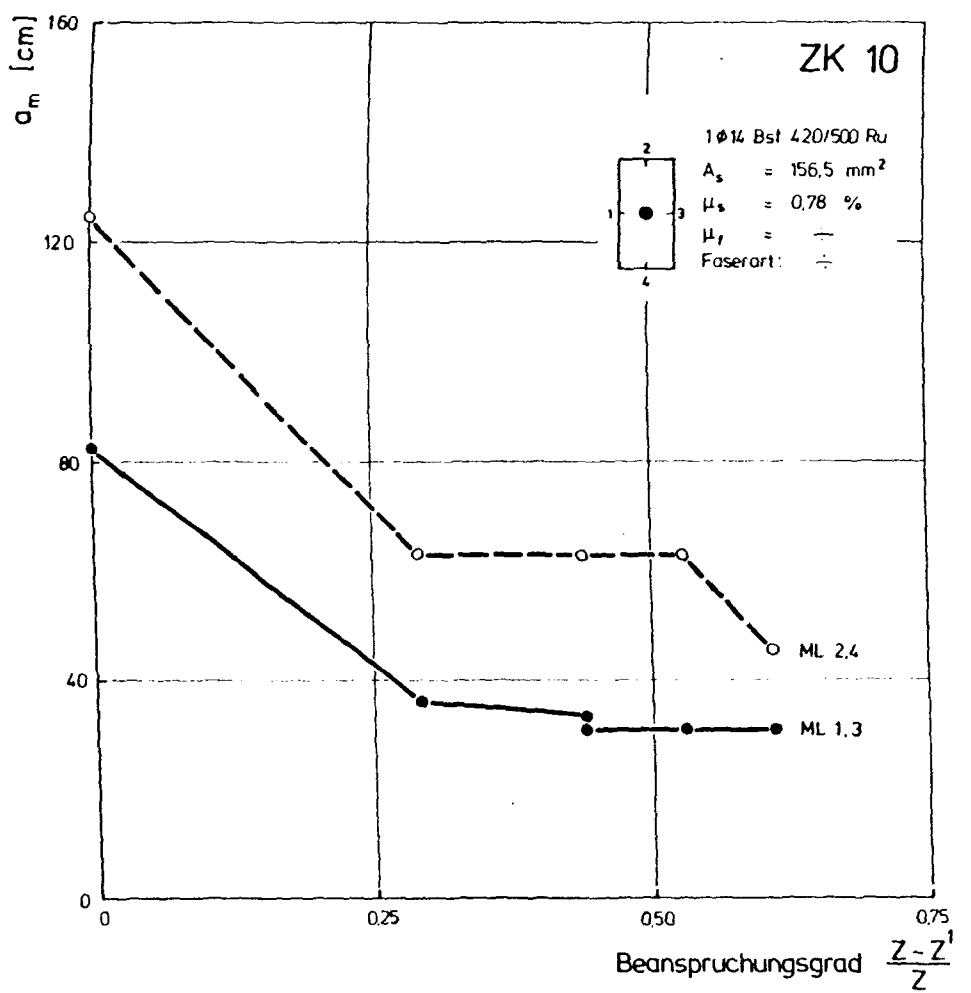
Mittlere Rißbreite  $w_m$  in Abhängigkeit von der Belastung für ZK 8



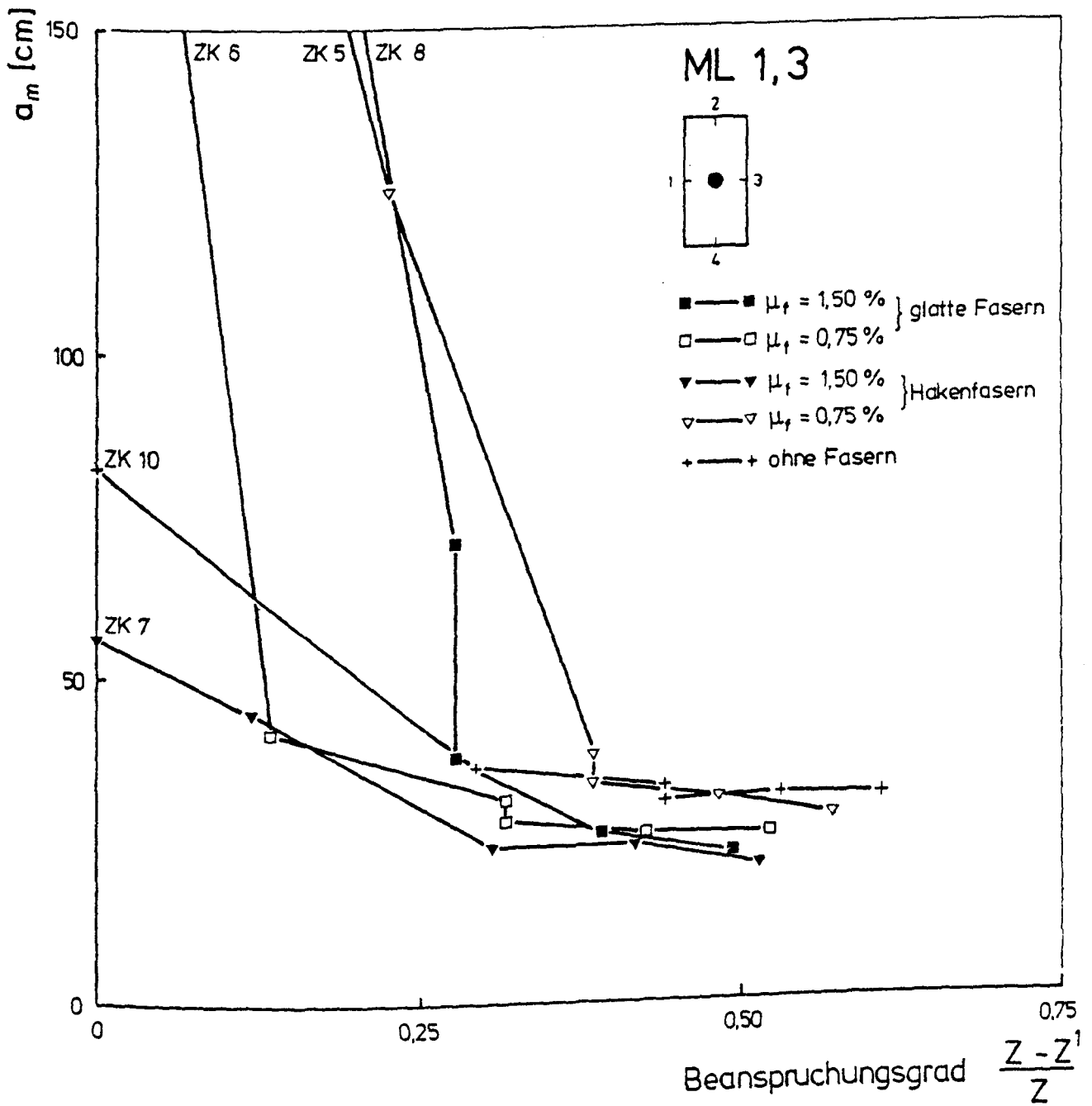
Mittlerer Rißabstand  $a_m$  in Abhängigkeit vom Beanspruchungsgrad für ZK 8



Gemessene und nach CEB gerechnete mittlere Rißbreite  $w_m$  in Abhängigkeit von der Belastung für ZK 10

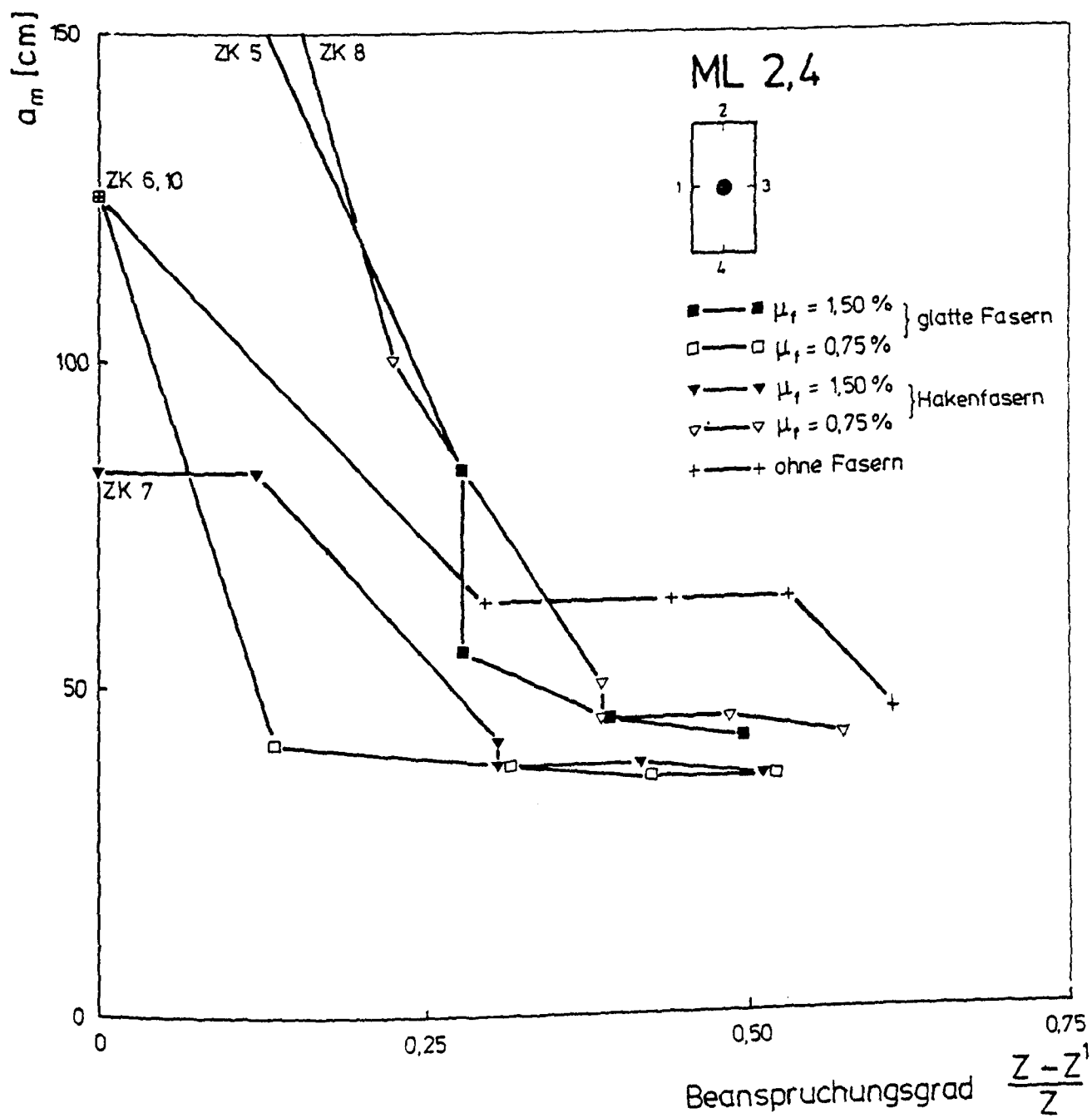


Mittlerer Rißabstand  $a_m$  in Abhängigkeit vom Beanspruchungsgrad für ZK 10

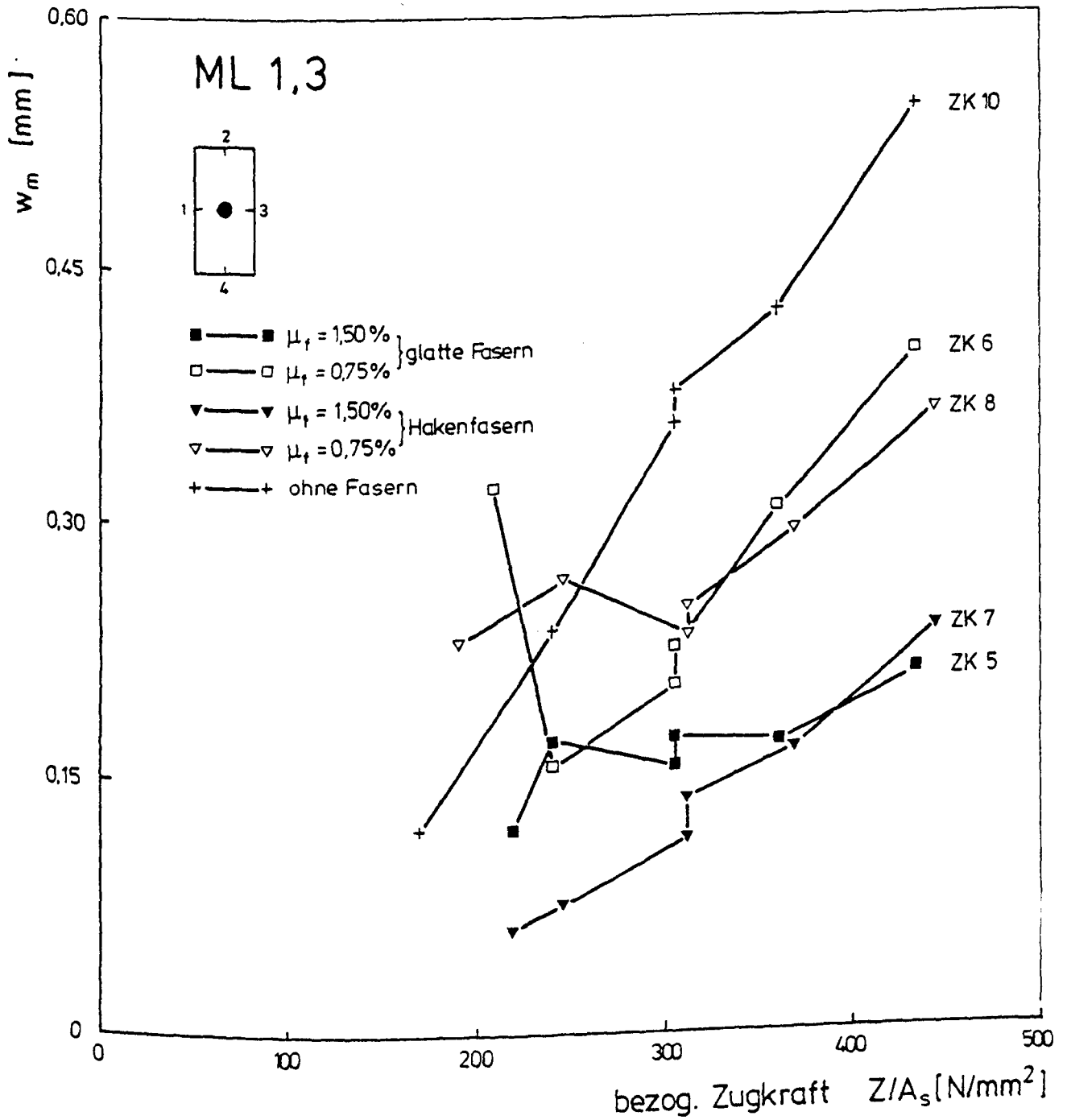


Mittlerer Rißabstand  $a_m$  in Abhängigkeit von der Beanspruchung -  
Versuchskörper mit einem Betonstab, Meßlinien 1 und 3

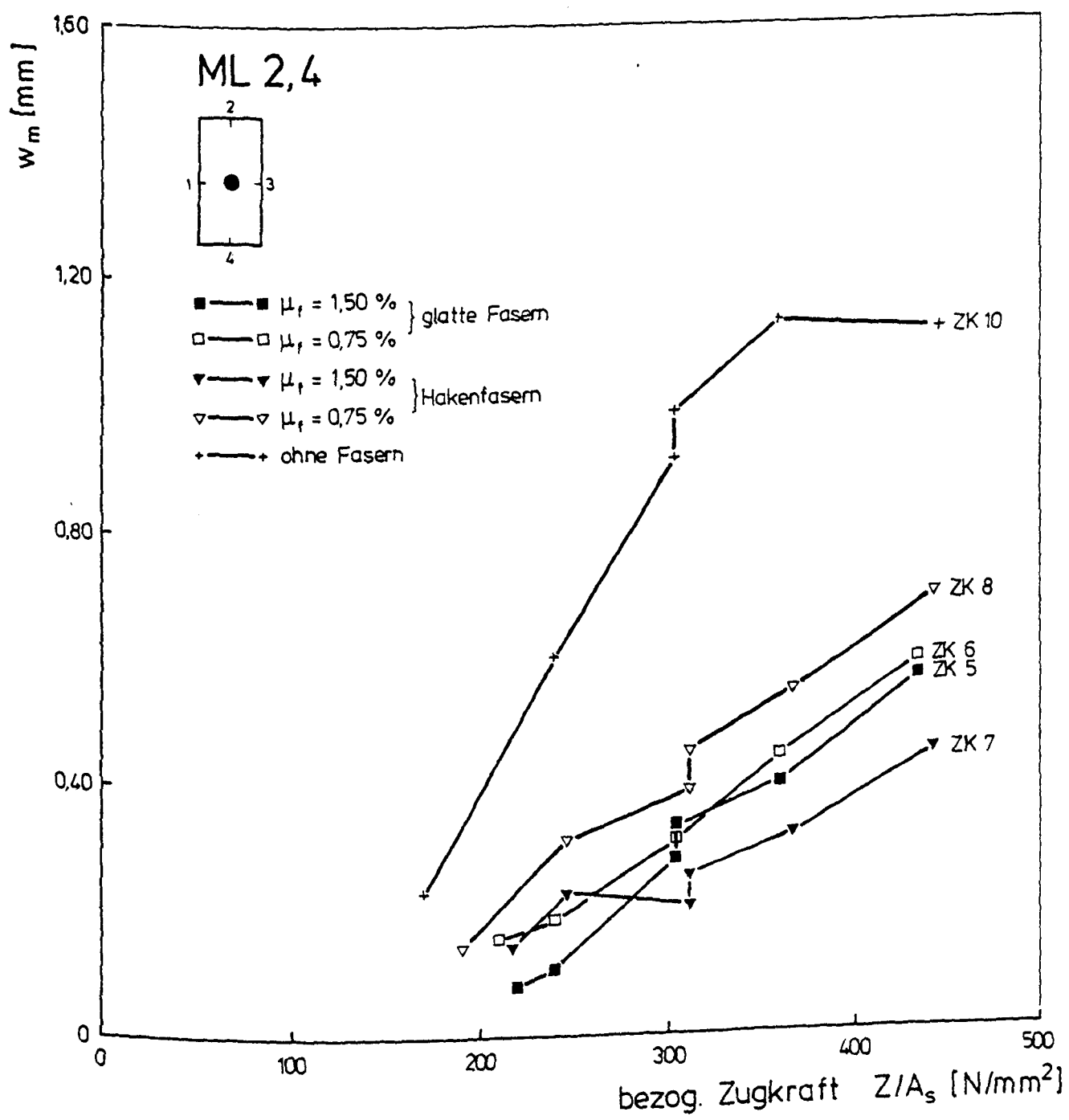




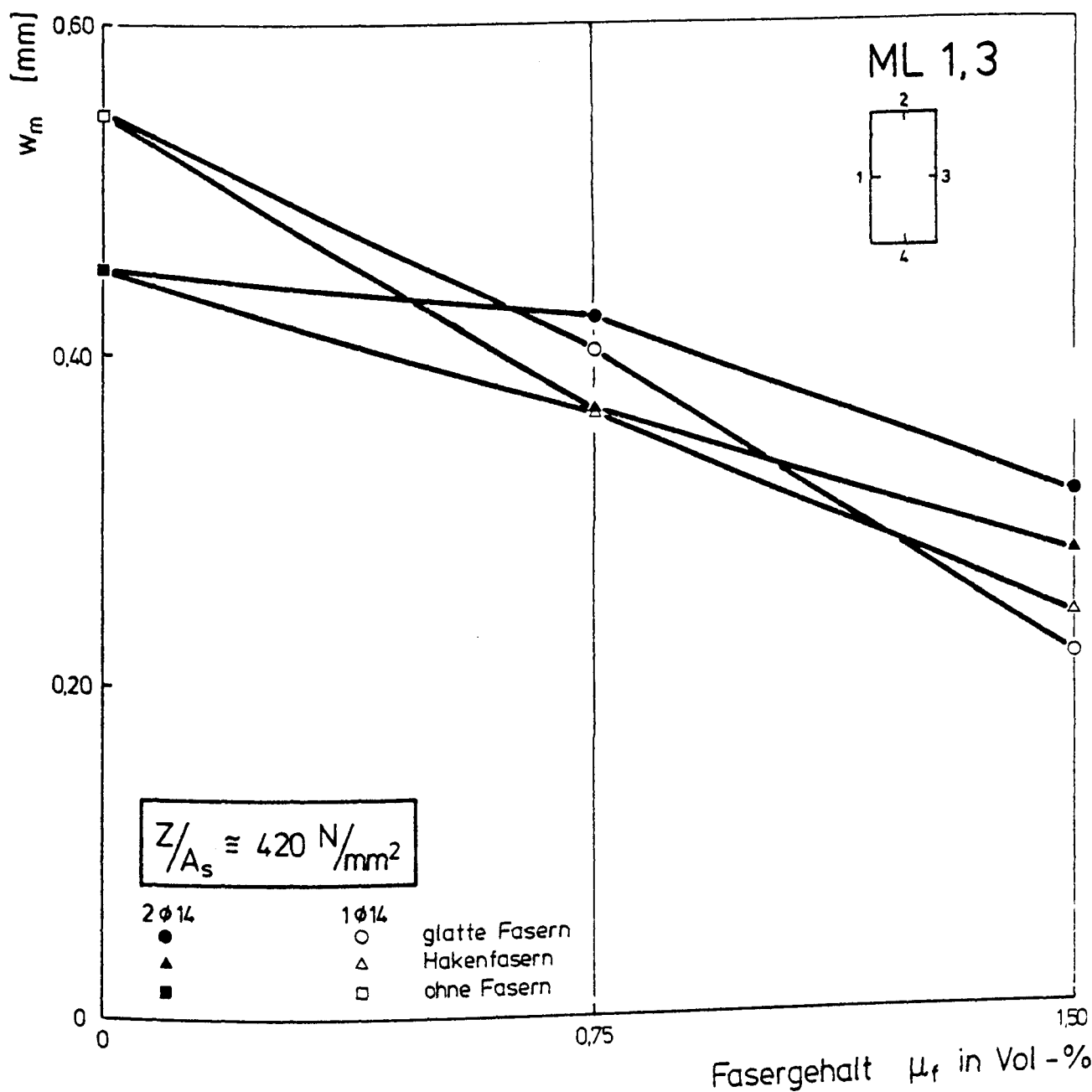
Mittlerer Rißabstand  $a_m$  in Abhängigkeit von der Beanspruchung -  
Versuchskörper mit einem Betonstab, Meßlinien 2 und 4



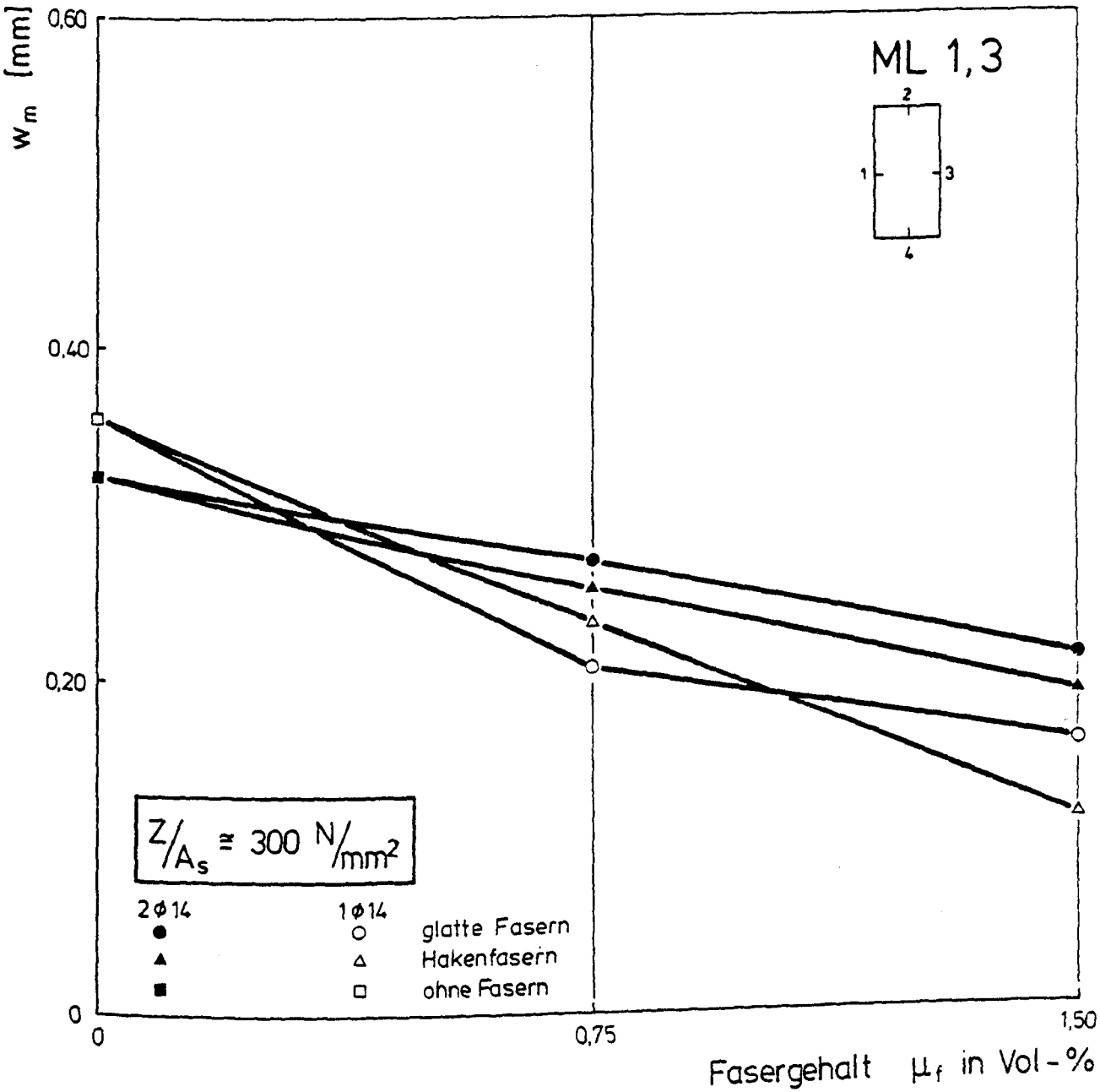
Mittlere Rißbreite  $w_m$  in Abhängigkeit von der Belastung -  
Versuchskörper mit einem Betonstab, Meßlinien 1 und 3



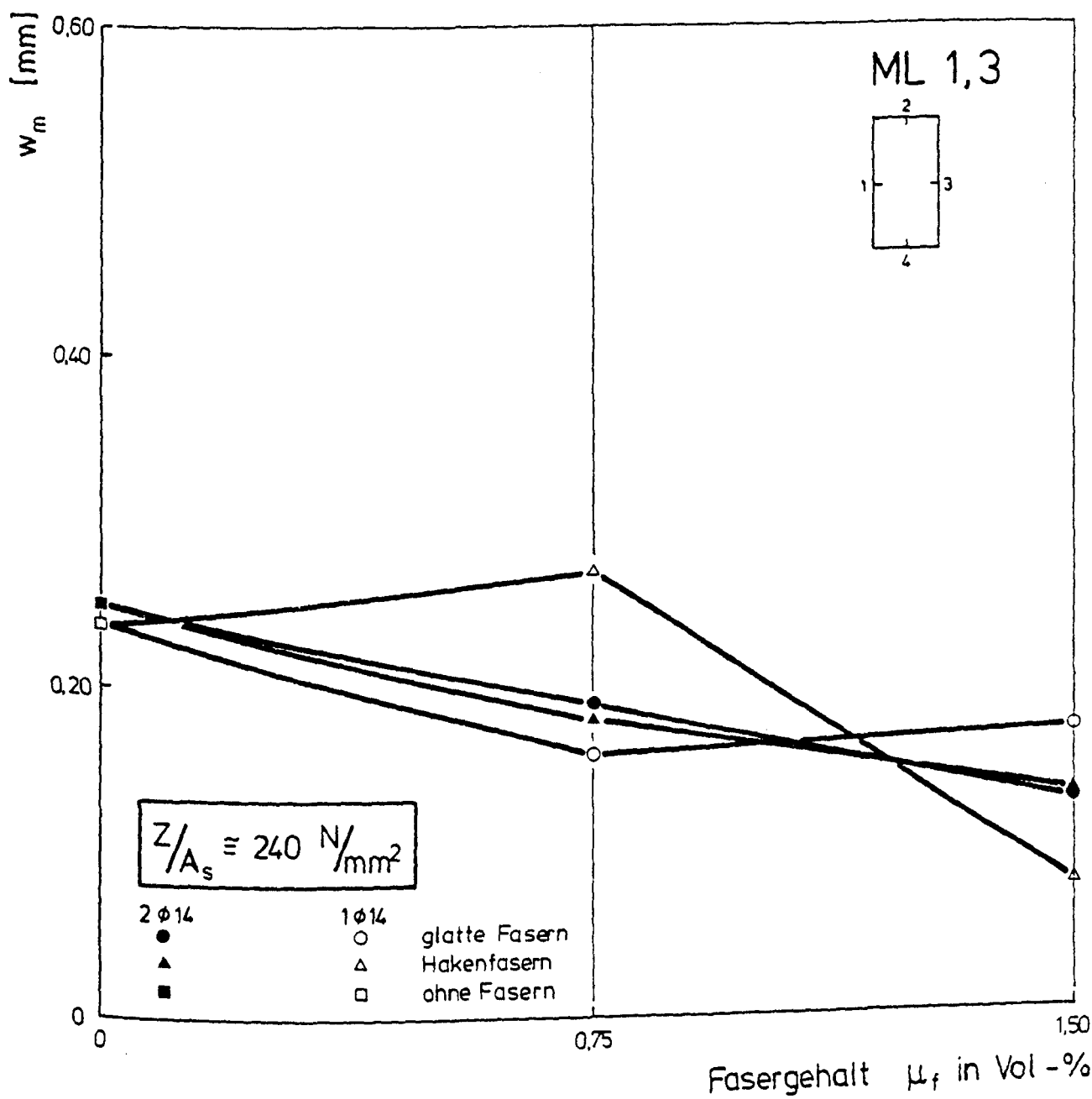
Mittlere Rißbreite  $w_m$  in Abhängigkeit von der Belastung -  
Versuchskörper mit einem Betonstab, Meßlinien 2 und 4



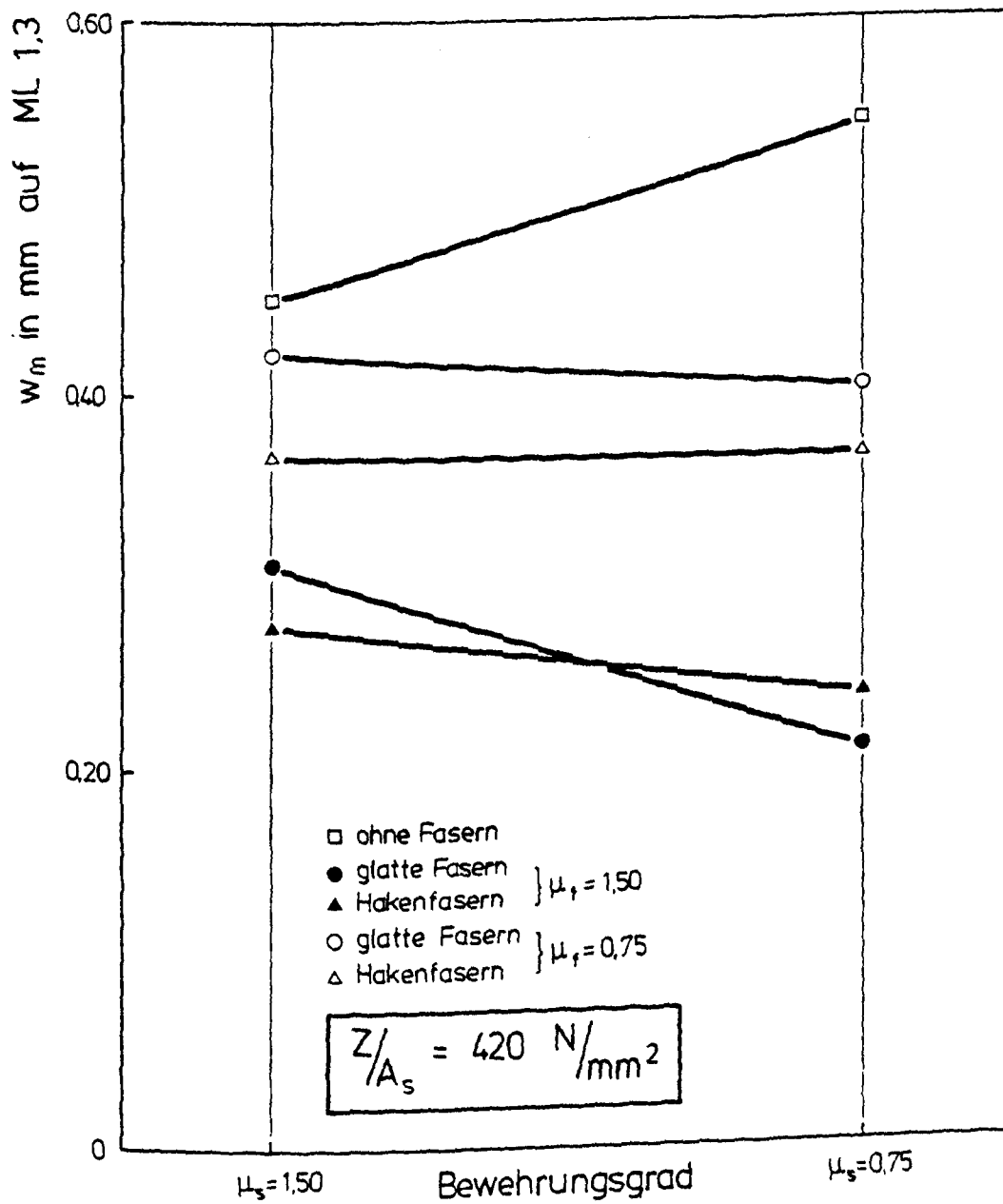
Mittlere Rißbreite  $w_m$  in Abhängigkeit vom Fasergehalt bei einer bezogenen Zugkraft von  $\approx 420 \text{ N/mm}^2$  - Meßlinien 1 und 3



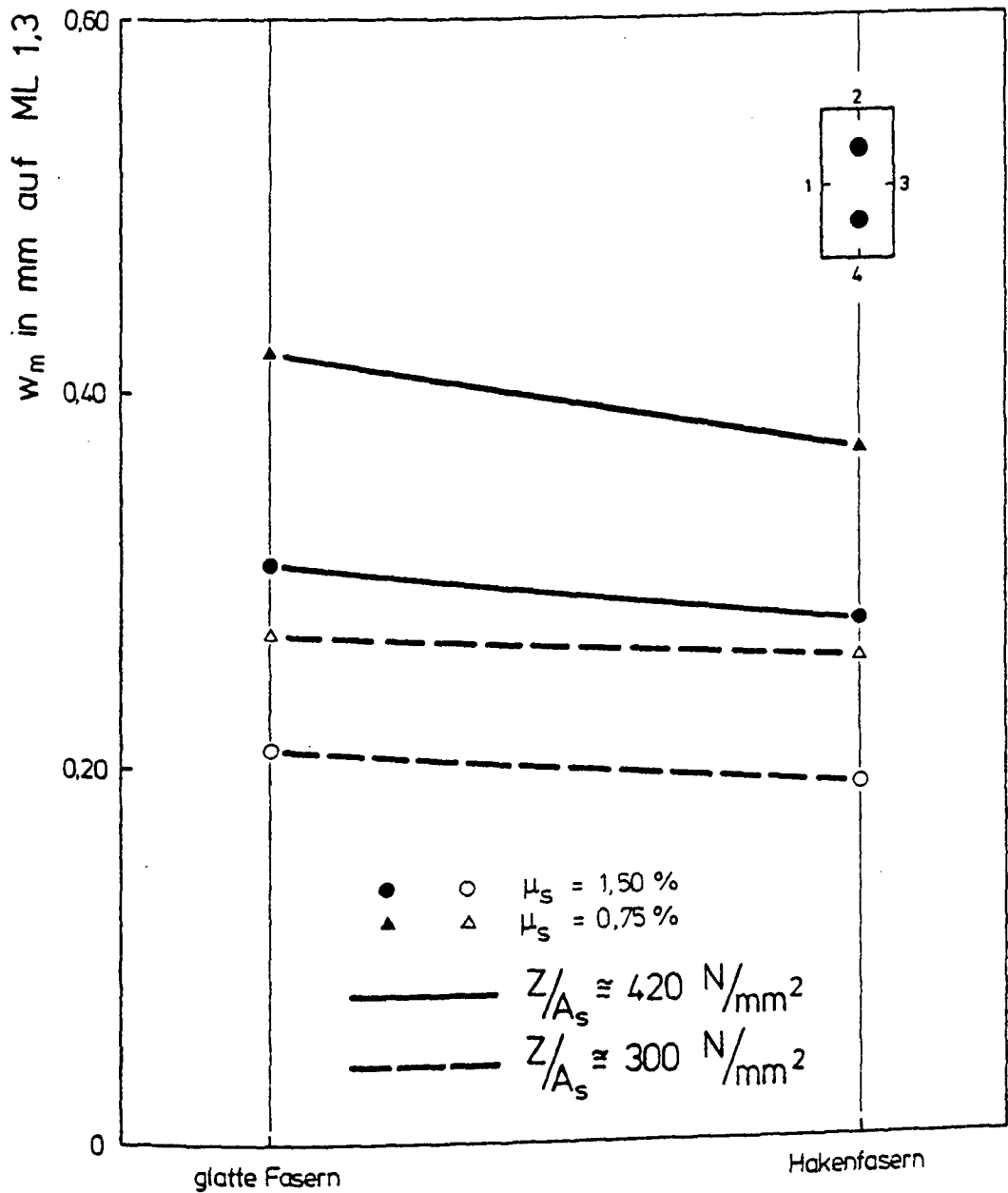
Mittlere Rißbreite  $w_m$  in Abhängigkeit vom Fasergehalt bei einer bezogenen Zugkraft von  $\approx 300 \text{ N/mm}^2$  - Meßlinien 1 und 3



Mittlere Rißbreite  $w_m$  in Abhängigkeit vom Fasergehalt bei einer bezogenen Zugkraft von  $\approx 240 \text{ N/mm}^2$  - Meßlinien 1 und 3



Mittlere Rißbreite  $w_m$  für zwei Bewehrungsgrade  $\mu_s$   
bei einer bezogenen Zugkraft von  $\approx 420 \text{ N/mm}^2$



Mittlere Rißbreite  $w_m$  in Abhängigkeit von der Faserart  
für zwei bezogene Zugkräfte